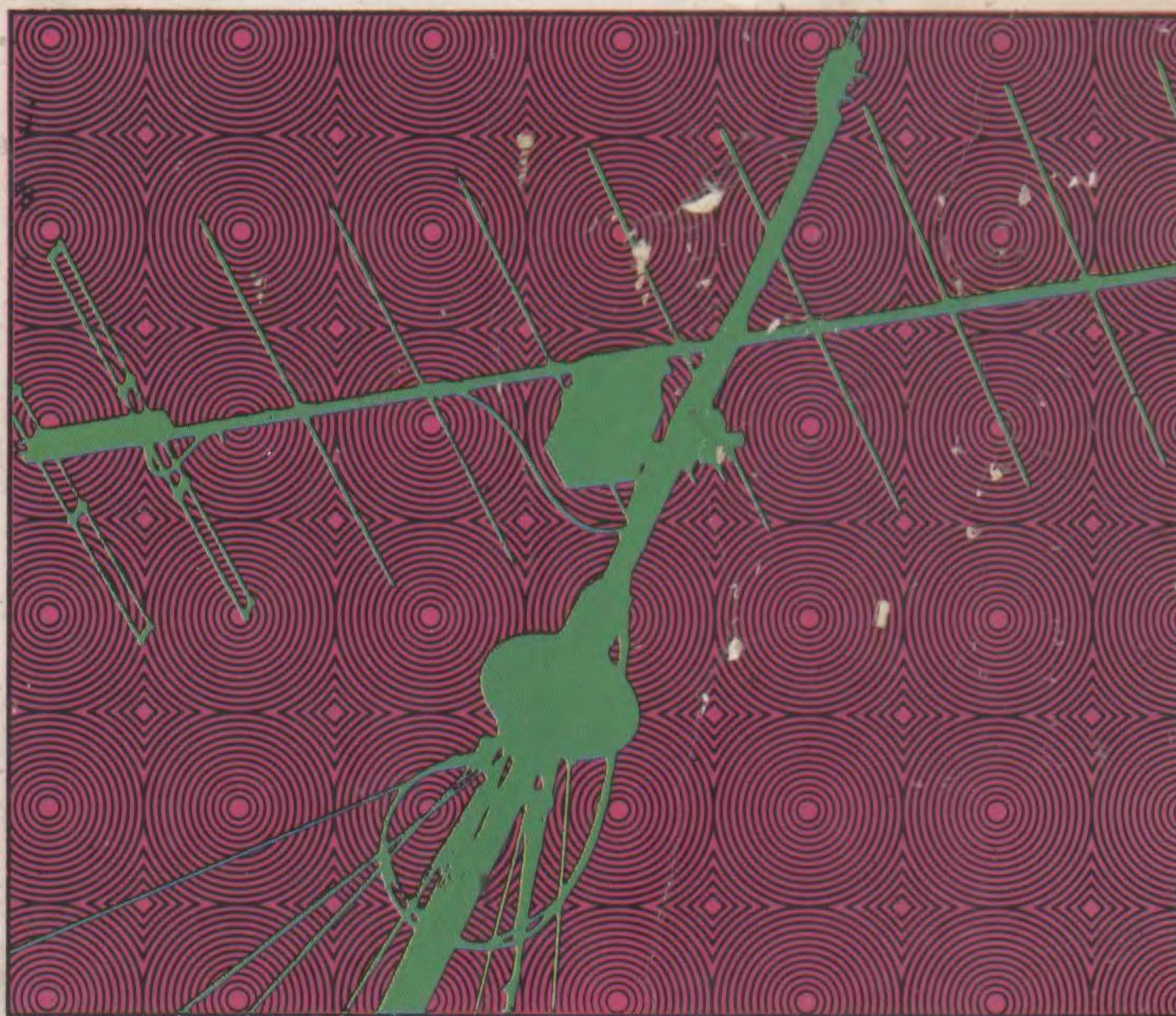
Nº 33

ANTENAS para la BANDA DE 2 METROS

F. C. Judd G2BCX



MANUALES TECNOLOGICOS

PARANINFO

MANUALES TECNOLOGICOS PARANINFO
Nº 33

ANTENAS para la BANDA DE 2 METROS

F. C. JUDD G2BCX

1984



MADRID

Traducido por:
DANIEL SANTANO Y LEON

Título original:
TWO-METRE ANTENNA HANDBOOK

IMPRESO EN ESPAÑA
PRINTED IN SPAIN

ISBN: 0-408-00402-9 (edición inglesa)
ISBN: 84-283-1333-4 (edición española)

Depósito Legal: M. 24.329-1984

PARANINFO SA Magallanes, 25 - Madrid (15) (3-3255)

GREFOL, S. A., Pol. II - La Fuensanta - Móstoles (Madrid)

INDICE DE MATERIAS

PREFACIO

Este libro está destinado a los que actualmente usan la banda de 2 metros, ahora tan popular, por vez primera, aunque los operadores ya experimentados en las bandas de VHF y UHF puedan encontrar algunas de las nuevas antenas –tales como las de la serie ZL– muy interesantes para probarlas. No he podido incluir en un libro del tamaño de éste todos los tipos de antenas, como es lógico, ni siquiera las específicas para las bandas inferiores de VHF, de la región de los 70 MHz, ni la banda de UHF de 430 MHz. Ello no obstante, las distintas antenas descritas aquí constituirán un amplio muestrario donde poder elegir, por lo menos una que se adapte perfectamente a las necesidades y circunstancias particulares, sobre todo en los casos en los que el espacio constituya el principal problema. Como es natural, todas las antenas descritas pueden ampliarse o reducirse a escala para otras bandas y sólo necesitan ser calculadas apropiadamente para conseguir con ellas las mismas prestaciones.

También he intentado cubrir los fundamentos de la propagación, las líneas de transmisión y su adaptación a las antenas, por lo menos con una amplitud suficiente para que el lector pueda adquirir un conocimientos útil de esos temas, ya que el pretender tratarlos a fondo habría supuesto gruesos volúmenes, mucho mayores que este libro. De todos modos, los lectores interesados en esos temas, o en alguno de ellos, podrá consultar la amplia bibliografía existente, y, desde luego, los usuarios de este tomo podrán encontrar en él soluciones a los que podríamos catalogar como "problemas corrientes", especialmente los relacionados con adaptación, cables de alimentación y la función ROE (relación de ondas estacionarias).

En unas épocas u otras he utilizado casi todas las antenas descritas en los capítulos 2 y 3, y por lo menos he comprobado las prestaciones de otras con el equipo de prueba de modelos de ant

na de UHF que se trata en el capítulo 5. Las que se incluyen de mi propio diseño, tales como la omnidireccional "Slim Jim" y la de haz "ZL", ya han conquistado un puesto bastante aceptable entre los operadores de la banda de 2 metros de muchos países. Tambien se incluyen detalles de otras dos antenas que hasta el momento no se han dado a conocer.

Muchos operadores de la banda de 2 metros han ayudado en algunas ocasiones a las pruebas de las nuevas antenas, en especial G3JMU, de Oulton Broad, en Suffolk, cuya colaboración en pruebas diarias de "largo alcance" desde mi original QTM de Londres resultó valiosísima para el desarrollo de algunos de los diseños de antenas contenidos en este libro. Mi agradecimiento a todos ellos, como es natural, a mi esposa Freda, que tuvo a su cargo la mecanografía del original, y a otros muchos que me han ayudado con fotos y documentación técnica.

F. C. Judd
(G2BCX)

Capítulo 1

LAS ONDAS. PROPAGACION Y FUNDAMENTOS

Como suele ser práctica común de todos los radioaficionados el utilizar la misma antena para transmisión que para recepción, es importante mantener una norma elevada de eficacia. Una antena mal ajustada, un cable de alimentación de mala calidad o impedancia equivocada, pueden ocasionar una alta relación de ondas estacionarias (ROE) y, como consecuencia, pérdida de potencia radiada y de señal recibida, con los efectos desastrosos que son de suponer, lo mismo que una mala colocación de la antena.

Dado que en la comunicación por radio manejamos ondas electromagnéticas que se desplazan por la atmósfera terrestre, convendrá dar algunas nociones de las características de las ondas y de cómo son influidas por las condiciones de la propagación. Este conocimiento es indispensable si se quiere trabajar en DX (larga distancia) con VHF, porque tan importante es saber cuándo son buenas las condiciones como tener una antena de excelentes prestaciones.

Características de las ondas

Las ondas eléctricas son una combinación de campos magnético y eléctrico, con la energía repartida por igual entre los dos. Si las ondas se originasen en una fuente puntual, en el espacio libre, se propagarían en esferas siempre crecientes, con la fuente en su centro. La velocidad con que esas esferas se expanden es la misma de la luz, dado que ésta es también una onda electromagnética. En el vacío, esa velocidad es de 299.792.077 metros por segundo, aunque para los cálculos generales se toma redondeándola a 300.000.000 m/s ó 300.000 km/s.

En un tiempo extraordinariamente pequeño, una esfera creciente, partiendo del centro, se haría muy grande, y para un observador situado en la superficie esférica –si pudiese ver en realidad la onda frente a él– le parecería plana en vez de redonda.

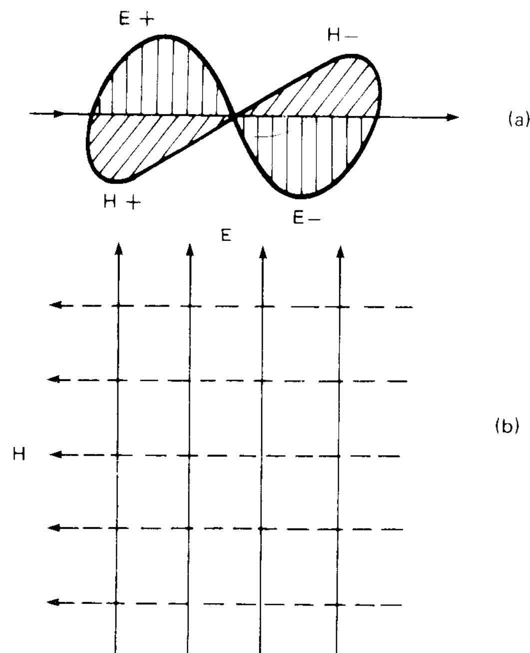


Fig. 1.1.- (a) Configuración de una onda de radio en el espacio libre. (b) Frente de onda a gran distancia de la antena emisora.

Un frente de onda que esté lo suficientemente lejos de la fuente para aparecer plana se llama *onda plana*, y las ondas de radio siempre cumplen esta condición, al menos en cuanto han recorrido una corta distancia desde la antena emisora. Una representación típica de las líneas de fuerza eléctricas y magnéticas de una onda plana es la que se indica en la fig. 1.1, en la que *(a)* representa una sección de una onda electromágnetica que se desplaza en el sentido de la flecha grande. En este gráfico, las líneas –que en realidad se prolongan indefinidamente– se han dibujado de longitud variable para reforzar la idea de una onda. El campo eléctrico E se indica vertical, y la onda en este caso está polarizada verticalmente, en tanto que el magnético H es horizontal, ya que ambos están siempre perpendiculares entre sí. Ahora bien la amplitud de la onda varía periódicamente (con la frecuencia de la transmisión) desde un valor positivo máximo hasta otro máximo negativo, pasando por cero; es decir, que la onda varía sinusoidalmente y por eso las antenas tienen que estar sintonizadas en resonancia.

Longitud de onda

La sección de onda representada en la fig. 1.1 *(a)* tiene exactamente una longitud de onda y su campo se repite cíclicamente en todo su recorrido. Si la longitud de onda fuese de 1 metro, por un punto dado pasarían 300.000.000 oscilaciones completas en un segundo. Como la velocidad de las ondas de radio es de 300.000.000 m/s y la longitud hemos dicho que –en este caso es de 1 m, la frecuencia puede determinarse *(f)* con la fórmula:

$$f = \frac{V\,(\text{velocidad})}{\lambda\,(\text{longitud de onda})}$$

que es entonces de 300.000.000 Hz ó 300 MHz. Un observador situado frente a la onda "vería" el campo como en la fig. 1.1. *(b)* alternándose con una frecuencia f. Este campo alterno es precisamente el que excita la antena receptora, impartiéndole parte de su energía.

Reflexión de las ondas

En la práctica las ondas de radio pueden ser refractadas y reflejadas, como la luz, por obstáculos situados en su trayectoria, tales como edificios grandes, montes, estructuras metálicas (torres, depósitos de gas, etc.). Si la conductividad de tales obstáculos es

alta, una gran parte de la onda quedará reflejada y se encaminará en otras direcciones; si esa conductividad es pequeña, una parte de la onda quedará absorbida, reflejándose una parte menor. Las ondas de radio pueden atravesar obstáculos poco conductores, como las paredes de ladrillo, aunque con alguna pérdida, y de aquí que sea posible usar antenas interiores para recepción y transmisión. Por lo contrario, las estructuras muy conductoras, como las estructuras metálicas de los edificios, situadas en el trayecto de las ondas pueden llegar incluso a impedir que éstas lleguen a la antena receptora por completo o, al menos, reducir su intensidad considerablemente.

Propagación de las ondas

Las ondas de radio se propagan de diferentes formas, según su frecuencia y polarización al salir de la antena emisora. Por ejemplo, en frecuencias bajas (ondas largas) las ondas polarizadas verticalmente, con una antena vertical, se desplazan muy cerca de la superficie de la tierra, lo que se conoce por lo común con el nombre de propagación por *onda terrestre*. La distancia para conseguir una buena recepción de las ondas terrestres es limitada, porque estas ondas van siendo absorbidas gradualmente por la superficie que recorren. De todos modos, en frecuencias más altas (longitudes de onda menores) y con antenas emisoras apropiadas, las ondas siguen un trayecto que forma un ángulo relativamente grande con la superficie del suelo. Estas ondas son reflejadas después hacia la tierra en un punto distante, por una capa ionizada situada en la atmósfera superior llamada *ionosfera*. A este tipo de propagación se la conoce como propagación por *onda celeste*, y a medida que aumenta la frecuencia de la transmisión (la longitud de onda se va haciendo más corta) se pueden cubrir distancias mayores como se ilustra en la fig. 1.2.

Por consiguiente, hay que elegir la frecuencia de transmisión y la antena utilizada en el emisor, sea para obtener un servicio a corta distancia (propagación terrestre), usando para ello bandas de frecuencias bajas y medias, o uno a larga distancia (propagación celeste), con frecuencias altas. Cuando la frecuencia de la transmisión es muy alta (VHF), las ondas de radio dejan de reflejarse en la ionosfera y la atraviesan. En este caso, para conseguir

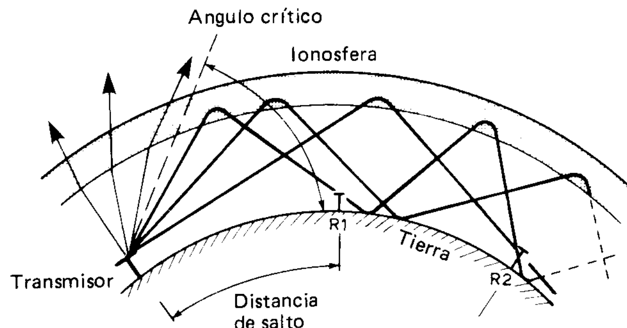


Fig. 1.2.– Explicación de cómo se "doblan" las ondas de radio en onda corta (alta frecuencia) alrededor de la tierra y llegan a puntos distantes por reflexión en las capas ionizadas de la atmósfera superior. El ángulo con el que vuelven a tierra depende del de incidencia y pasado uno determinado, llamado crítico, ya no regresan, sino que se pierden en el espacio.

una buena recepción, la antena transmisora tiene que "ver" la receptora, y la propagación es por *onda espacial*, llamada más comúnmente "propagación óptica". Siempre que no haya obstáculos grandes, como montañas o edificios altos, en el trayecto, el alcance puede llegar a ser el del horizonte visible o mayor aún, según la altura a que se encuentren las antenas emisora y receptora.

La estructura de la atmósfera junto a la superficie del suelo es tal que en condiciones normales las ondas se curvan un poco, siguiendo un trayecto más cercano a la tierra de lo que la pura línea de visión sería. Este efecto puede aproximarse matemáticamente suponiendo que las ondas se desplazan en línea recta, pero que el radio de la tierra ha *aumentado* en un tercio. Con este supuesto, la distancia desde la antena emisora hasta la receptora al nivel del suelo en el horizonte está dada por la fórmula siguiente:

$$D\,(\text{km}) = 3{,}93 \times \sqrt{H}\,(\text{metros})$$

siendo H la altura de la antena emisora, tal como se representa en la fig. 1.3 donde se ha supuesto que la superficie de la tierra es completamente lisa y que no hay obstáculo alguno en el trayecto de las ondas. Si hace falta conseguir una recepción más allá del horizonte, hay que aumentar la altura de la antena receptora, como en R2. La línea máxima de visión es ahora de un alcance $D1 + D2$.

Propagación troposférica

Las condiciones meteorológicas en la atmósfera, en alturas que van de varios cientos de metros a kilómetros o así, son a veces responsables de que las ondas de radio se "doblen" en VHF hacia abajo. Esta refracción troposférica permite la comunicación en VHF a mayores distancias de lo que sería normal con la propagación visual.

La importancia de ese "doblado" aumenta con la frecuencia, y la transmisión y la recepción mejoran conforme la frecuencia excede de los 50 MHz. Esta es la explicación de por qué a veces es posible la recepción de televisión y emisiones de FM en VHF. La refracción en la troposfera se realiza cuando quedan estratificadas masas de aire en regiones que tienen constantes dieléctricas diferentes. Si el límite entre las dos masas de aire está definido muy claramente, puede efectuarse la refracción y la reflexión de las ondas que lleguen a ese límite con ángulos rasantes.

La causa más común de la refracción troposférica es la inversión térmica. Normalmente, la temperatura de la atmósfera inferior disminuye con un ritmo constante aproximado de 2°C por cada 300 m de altitud. Al reducirse este ritmo por alguna causa, se dice que se produce una inversión térmica, y en tal caso aparecerá un doblado mayor de lo normal en las ondas. Dado que las condiciones atmosféricas causantes de la refracción troposférica pocas veces duran un tiempo considerable, la intensidad de las señales recibidas suele variar, apareciendo el desvanecimiento. Las ondas troposféricas también suelen conservar, por lo general, su polarización en todo el trayecto.

Conductos atmosféricos

En algunas partes del mundo, sobre todo en los trópicos o sobre grandes masas de agua, las inversiones térmicas están presentes casi constantemente, a alturas de unos pocos cientos de metros o menos. El límite de la inversión suele estar bien definido, lo que hace que las ondas que se desplazan horizontalmente queden "atrapadas" por la capa de aire refractora y sea doblada continuamente hacia tierra. La capa de aire y la tierra forman entonces una especie de paredes superior e inferior de un conducto por el que las ondas quedan guiadas, de un modo muy parecido a como lo hacen las microondas por las guías metálicas. De esa manera, las ondas siguen la curvatura terrestre hasta distancias mucho más allá del horizonte, llegando a veces incluso a centenares de kilómetros.

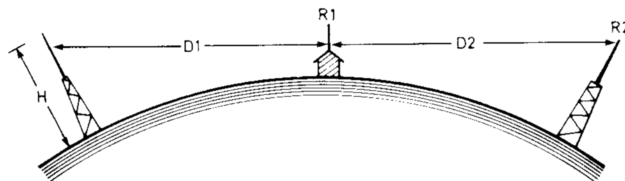


Fig. 1.3.– Propagación visual y línea de recepción en VHF y UHF.

Propagación visual

Cuanto más altos nos ponemos, más lejos podemos ver. Esta simple constatación podemos aplicarla casi en su totalidad a la propagación de radio en VHF y UHF a distancias visuales. Pero el radioaficionado se ve obligado la mayoría de las veces a erigir antenas hasta alturas bastante limitadas (en comparación, por ejemplo, con los mástiles usados por las estaciones de radiodifusión, que además suelen estar en lugares elevados). Afortunadamente para ellos, también hay aficionados que viven en sitios altos. La propagación de las ondas en VHF y UHF seguirá normalmente un trayecto paralelo al suelo, de alcance limitado al visual. Como se indica en la fig. 1.3, esta distancia puede aumentarse haciendo más altas las antenas transmisora y receptora, pero subsiste aún un problema, que la fig. 1.4 se encarga de aclarar: A la vez que una onda sale de la antena transmisora T para llegar recta hasta la

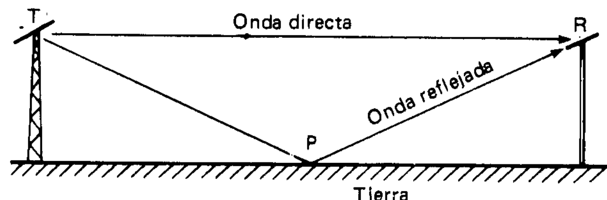


Fig. 1.4.– Onda directa y reflejada en el suelo. Según sea la diferencia de recorrido, las dos ondas pueden llegar a la antena receptora en fase o desfasadas e incluso en oposición.

receptora R, una parte de esa onda llega también hasta el suelo, donde se refleja en un punto P, desde el cual puede alcanzar asimismo la antena receptora por otro camino. Según sea la diferencia entre los trayectos de estas dos ondas que llegan a la antena, la parte reflejada llegará a R con la misma fase que la directa o con un cierto desfase respecto a ella. El resultado será pues un refuerzo de la señal en el primer caso, o una debilitación en el segundo, dado que las señales en fase se suman y las desfasadas se restan.

Ocurre a veces que el simple movimiento de la antena receptora, o la transmisora, en una fracción de su longitud de onda, en una dirección u otra, o simplemente una variación de la frecuencia transmitida, hace que una señal que antes se recibía débil pase a tener una gran intensidad. Este efecto resulta notorio especialmente cuando se emplean ondas polarizadas verticalmente, con antenas verticales en transmisión y recepción.

La fig. 1.5 corresponde a unas medidas reales, efectuadas en la banda de 2 m (144 a 146 MHz), y demuestra lo bruscas que pueden llegar a ser las fluctuaciones de la señal en función de la frecuencia cuando se usan antenas polarizadas verticalmente y se transmite con trayecto visible.

En la práctica, la propagación de las ondas de VHF y UHF queda mucho más gravemente afectada por las "sombras" debidas a edificios altos, terrenos boscosos y montañas, así como por las pérdidas causadas por difracción y absorción. Cuanto más alta es la frecuencia, más grave se hace esta influencia, y como son tantas las variables que intervienen en la línea de propagación, resulta casi imposible calcular los alcances útiles y los niveles de señal en el extremo receptor, excepto en los casos de línea visual prácticamente exenta.

En realidad, el trabajo a largas distancias en 2 m y 70 cm (145 MHz y 420 MHz) depende casi en su totalidad de la propagación troposférica o, como dicen los radioaficionados, de unas buenas condiciones de propagación. Las circunstancias necesarias para establecer un sistema de antenas y esperar confiadamente en realizar enlaces a una distancia dada en cualquier momento y con independencia de esas "condiciones de propagación" del tipo que sean, son de veras muy raras.

La mejor ayuda para trabajar con éxito a larga distancia es una buena altura de las antenas de emisión y recepción, así como un ángulo de radiación relativamente bajo (paralelo al suelo).

La fig. 1.6 puede dar una idea de las distancias visuales con varias alturas de antenas emisora y receptora. Los gráficos típicos

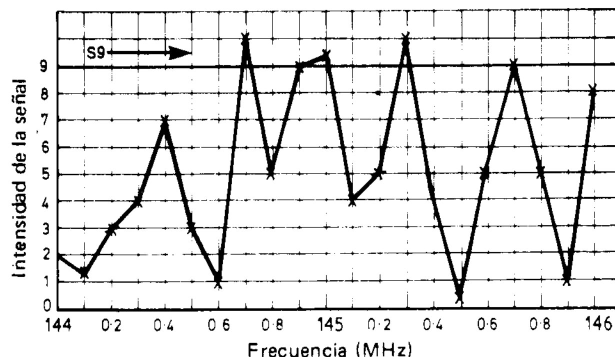


Fig. 1.5.– Variación del nivel de señal en un trayecto constante con varias frecuencias de la banda de 2 m. Las antenas emisora y receptora, verticales.

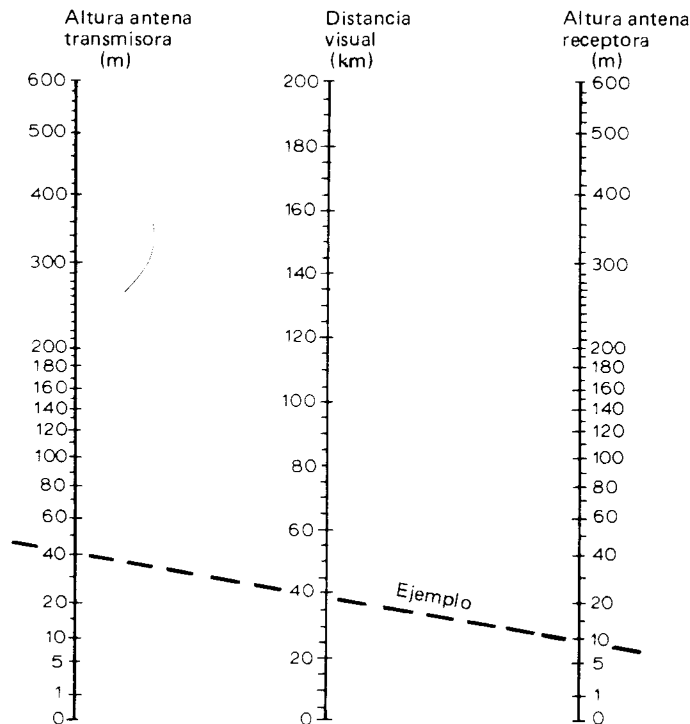


Fig. 1.6.– Distancia visual en radio con distintas alturas de las antenas emisora y receptora. El ejemplo demuestra cómo se obtiene la distancia.

de potencia/alcance con trabajo móvil y una estación base fija de transmisión que utilice una antena omnidireccional de ganancia unidad situada a una altura de 30 m son los que se dan en la fig. 1.7.

Otras condiciones de propagación

Las listas bibliográficas incluidas al final de los capítulo proporcionarán muchos más detalles acerca de las condiciones de la pro-

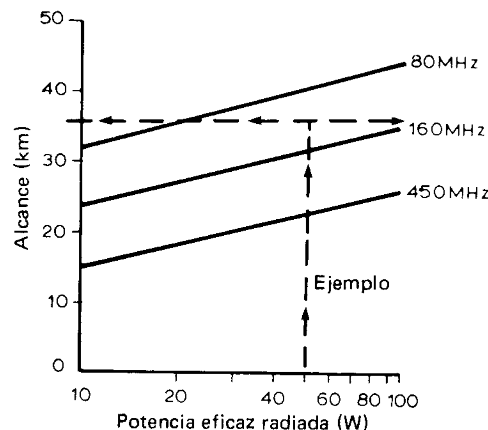


Fig. 1.7.– Alcance probable con una potencia radiada eficaz dada en VHF, de una estación base que utiliza una antena omnidireccional de ganancia unidad, destinada a otras móviles.

pagación que lo que podamos incluir en este libro. Ello no obstante, trataremos algunos otros medios de propagación en VHF y UHF (dispersión troposférica, dispersión ionosférica, reflexión auroral, dispersión meteórica y capa E esporádica).

Dispersión troposférica

Es muy parecida a la propagación troposférica normal, excepto en que las señales de retorno quedan reflejadas o refractadas por bancos de nubes existentes en el trayecto de la transmisión. La atenuación es mayor, por lo que se necesitará una potencia superior, con la cual, no obstante, podrán alcanzarse distancias hasta de 800 km.

Dispersión ionosférica

Las nubes inosféricas constituyen una superficie reflectante para bajos ángulos de radiación con ondas de frecuencia relativa-

mente alta, y con una serie de saltos pueden franquearse distancias considerables con un trayecto más o menos recto.

A esta dispersión se la conoce por lo común por dispersión de avance o hacia delante y, aunque se trata de algo completamente regular, es probable que se necesiten grandes potencias para contrarrestar la gran atenuación impuesta. Suele aprovecharse en las bandas de radioaficionado de 21 y 28 MHz.

Reflexión auroral

Se produce en zonas cercanas a las regiones polares y durante tormentas ionosféricas o magnéticas, que es cuando aparece una actividad auroral más acusada. Las frecuencias en que se tiene reflexión por este medio son aproximadamente las de 150 MHz, y la propagación se caracteriza por unas variaciones rápidas, que dificultan enormemente la telefonía, pero afectan poco a la onda continua. La radiación debe dirigirse, como es lógico, a los casquetes polares –norte o sur, según la localidad de que se trate– y la antena receptora tendrá que estar orientada también a ellos.

Dispersión producida por cola de meteoro

Se trata de un fenómeno de corta duración, que a menudo es inferior a un minuto, producido cuando la atmósfera superior queda atravesada por un meteoro que deja tras de sí una cola de ionización. Esto causará una reflexión parcial de las ondas de VHF. Pueden usarse para aprovechar este fenómeno las frecuencias cercanas a los 21 MHz y hasta los 145 MHz. Son esenciales una alta potencia y antenas muy eficaces.

Capa E esporádica

Aproximadamente a la misma altura que la capa E normal suelen formarse nubes muy ionizadas, de modo esporádico y al azar, las cuales varían de intensidad y se desplazan con rapidez del sudeste al noroeste en el hemisferio norte. Se producen más frecuentemente en el período comprendido entre mayo y agosto, y en ocasiones en pleno invierno, pero las apariciones estacionales se invierten en el hemisferio sur. La frecuencia útil máxima (MUF) es

función de la densidad de ionización y por lo general está alrededor de los 50 MHz. Suele ser posible la comunicación a larga distancia en 2 m, pero con un porcentaje bastante bajo, en comparación con los 50 MHz, por ejemplo. En condiciones favorables pueden alcanzarse distancias de 3.000 km e incluso más.

Intensidad de campo

No es en sí un parámetro muy predecible en VHF y UHF, excepto en distancias visuales relativamente ininterrumpidas. Las intensidades de campo calculadas y medidas presentan una similitud razonable en 145 MHz para tipos dados de antenas transmisoras con varias alturas sobre el suelo (suponiendo el cero al nivel del mar) y con trayectos de transmisión en regiones relativamente planas, es decir, sin montes.

En la fig. 1.8 se indican las señales medias calculadas y medidas que se obtuvieron usando una antena transmisora situada a una altura de 20 m, con una potencia radiada eficaz (ERP) de unos 100 W, en 145 MHz. Los niveles de señal representados quedan dentro de la zona rayada y corresponden a recepción con antenas de rendimiento razonable y colocadas a alturas medias de 10 m.

La medida de la intensidad de campo resulta difícil de conseguir con exactitud y los radioaficionados deberán establecer sus propias referencias si quieren obtener una información útil. Los medidores de intensidad de campo incluidos en los receptores o emisores comerciales son prácticamente inútiles, a menos que se trate de fines comparativos, y lo mismo podemos hacer extensivo a la medida de intensidad de campo para determinar la ganancia de las emisores.

Polarización

La polarización de una antena de media onda es siempre la misma que la dirección de su eje, cuando la distancia es lo suficientemente grande para que la onda pueda considerarse plana. Esto significa que el campo eléctrico es el mismo que la dirección de la antena (por eso, las antenas verticales radian ondas

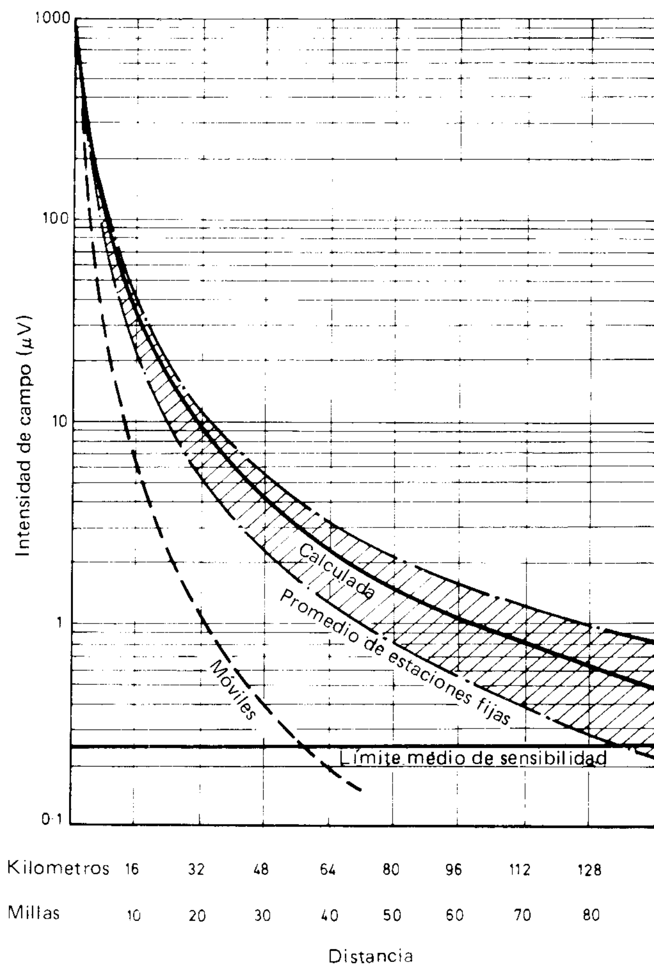


Fig. 1.8.– Intensidad de campo calculada y medida (zona rayada). Antena emisora a 20 m sobre el suelo; la receptora, a un promedio de 10 m, también sobre el suelo.

polarizadas verticalmente, como en la fig. 1.9). Con antenas que tengan varios elementos de media onda situados en la misma dirección, la polarización se efectuará en esa dirección. Si el sistema de antenas consta de elementos verticales y horizontales que radien *en fase*, la polarización será *lineal*, es decir, inclinada entre vertical y horizontal (que a veces se llama polarización oblicua). Si los elementos verticales y horizontales se alimentan *desfasados*, la polarización será circular o elíptica: en el primer caso, el frente de onda que atraviesa la antena receptora gira cada cuarto de ciclo entre vertical y horizontal, completando así una rotación completa cada 360°. Las antenas de polarización circular se usan mucho en comunicación espacial.

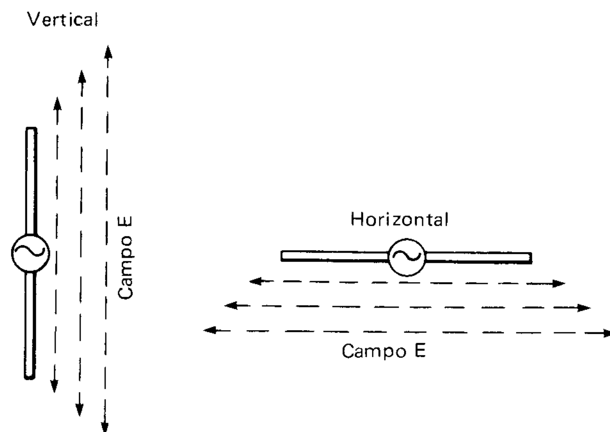


Fig. 1.9.– Polarización: antenas verticales para polarización vertical y horizontales para la horizontal.

De todos modos, la polarización de una onda puede variar a lo largo de su trayectoria y es muy común en VHF. No reviste caracteres graves, al menos no lo suficientemente graves como para obligar a una rotación de la antena, que pase de vertical a horizontal, o viceversa. Las pruebas llevadas a cabo, tanto con estaciones cercanas como lejanas, utilizando antenas transmisoras polariza-

das verticalmente han revelado una cierta orientación de la polarización, como se ve en la fig. 1.10.

Más importante es ya el efecto de la polarización cuando se trabaja a largas distancias. Las investigaciones y las pruebas efectuadas a lo largo de varios años han revelado que en las bandas de 2 m y frecuencias superiores la polarización horizontal es muy superior y resulta mucho menos sujeta a la atenuación del trayec-

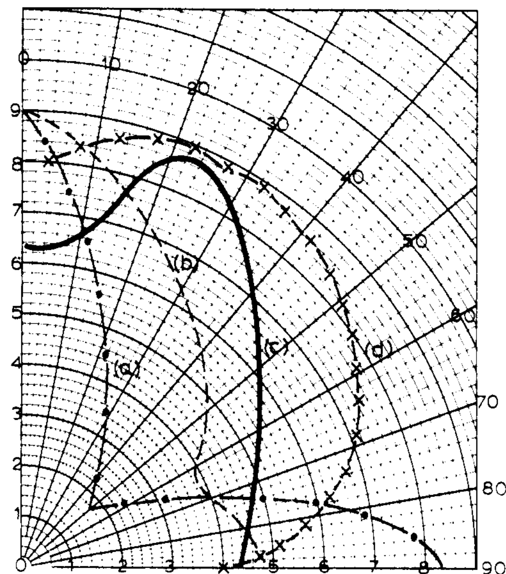


Fig. 1.10.– Eefecto de un trayecto en el que la polarización se invierte. (a) Desde una estación próxima fija que emplea plano de tierra; (b) desde una estación fija próxima que utiliza una vertical en espacio libre; (c y d) Desde estaciones repetidoras alejadas. Un ligero cambio en la polarización de la antena receptora presenta un aumento de la intensidad de la señal, sobre todo en el caso (c).

to y el desvanecimiento en condiciones de propagación troposférica y similares. En un trayecto paralelo al suelo, las señales polarizadas verticalmente sufren una atenuación considerable y son mucho más propensas a los efectos de desfase.

La polarización vertical sólo se ha difundido debido a su empleo en equipos móviles y repetidores y al uso de antenas omnidireccionales (verticales). La mayoría de los operadores de 2 m pierden muchos de sus contactos a larga distancia (DX) por no usar antenas polarizadas horizontalmente.

Resonancia

Las antenas se construyen normalmente con metales de buena conductividad, tales como aluminio, cobre, etc., pero para que sean eficaces han de estar en resonancia con la onda recibida, lo que significa que tienen que estar sintonizadas eléctricamente a la frecuencia de transmisión (o recepción). El trozo más pequeño de conductor que resonará con una frecuencia dada es el que tiene una longitud que sea exactamente la que permita a una carga eléctrica recorrerlo de un extremo al otro y volver mientras dura un ciclo de la onda sintonizada.

Si –como ya se ha dicho– la velocidad con que se desplaza la carga es igual a la de la luz (300.000 km/s), la distancia que ha de recorrer la carga en un ciclo será igual a la longitud de onda. Como la carga recorre el conductor *dos veces*, la longitud necesaria para que la carga recorra una longitud de onda será de $\lambda/2$ o sea media longitud de onda (en la práctica, un poco menos como consecuencia del factor de velocidad del conductor). Las corrientes de radiofrecuencia se desplazan más despacio en los conductores metálicos que en el espacio libre.

La distribución de la corriente y la tensión en una atena de media onda (o dipolo) es la que se da en la fig. 1.11. Al alcanzar una carga el extremo del dipolo se invierten su dirección y su fase, con lo que se obtiene un flujo de corriente alterno en todo el ciclo, aunque la corriente y la tensión estén siempre entre sí en oposición de fase: cuando la tensión es máxima, la corriente es mínima, y viceversa. Siempre que se mantenga la resonancia, el máximo de corriente se tendrá en el centro del dipolo, punto en

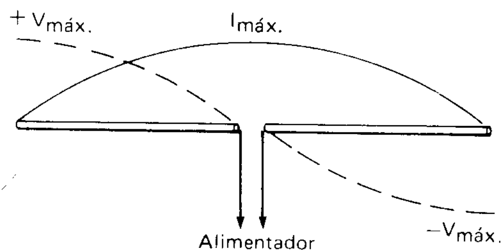


Fig. 1.11.– Distribución de la corriente y la tensión en un dipolo de media onda.

el cual la impedancia será baja, del orden de 72 Ω, lo que la hace apropiada para su conexión directa a un cable coaxil de 70 ó 75 Ω o un alimentador de hilo abierto de la misma impedancia.

La longitud física de un dipolo de media onda en resonancia es inferior a su longitud eléctrica, como consecuencia del factor de velocidad del conductor. La ecuación:

$$\text{longitud en metros} = \frac{150 \times K}{f} \quad (f = \text{frecuencia en MHz})$$

nos da K, que es el factor de velocidad del conductor utilizado en la antena, que para fines prácticos puede tomarse como de 0,95. La longitud de un dipolo para la banda de 2 m (frecuencia central, 145 MHz) sería pues:

$$\frac{150 \times 0{,}95}{145} = 0{,}98 \text{ m}$$

Directividad

La intensidad de radiación de una antena, así como su facultad de recibir señales, no son nunca iguales en todas las direcciones y en realidad incluso pueden ser nulas en alguna. Aunque no existe ninguna antena que transmita o reciba por igual en todas direcciones, conviene que supongamos que sí. Esta antena hipotética es la que se llama *isotrópica* y suele utilizarse como patrón para comparar las prestaciones de otras.

El gráfico de radiación o recepción de una antena isotrópica sería en realidad una esfera y la antena en sí tendría que considerarse puntual. Por comparación, el gráfico de radiación de una antena de media onda es, si se toma en todas las direcciones alrededor de ella, de foma toroidal, como se indica en la fig. 1.12 *(a)*. El gráfico en cuestión se conserva inalterable, esté la antena hori-

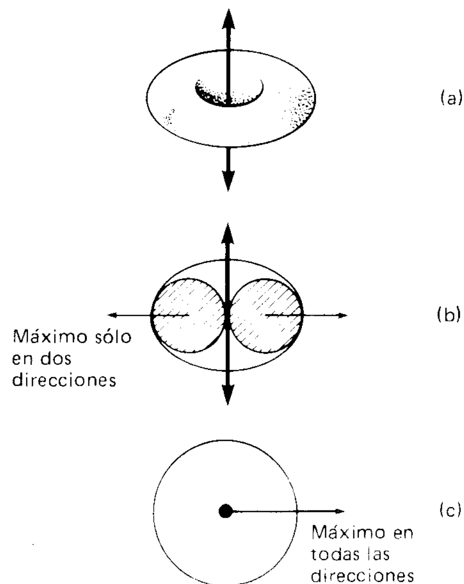


Fig. 1.12. (a) Visto en tres dimensiones, el campo de radiación de un dipolo es un toroide. (b) Cortando por un plano perpendicular este toroide se obtiene una curva octoide. (c) Mirando desde el extremo de la antena, la radiación es igual en todas las direcciones.

zontal o vertical, siempre que se encuentre en el espacio libre o, en la práctica, por lo menos a varias longitudes de onda sobre el suelo.

En la fig. 1.12 *(b)* se ha cortado por la mitad el toroide para que se pueda ver la forma de la sección, que sigue siendo la misma, con independencia de que la antena esté vertical, como en la figura, u horizontal. Por consiguiente, la directividad es grande en dos direcciones (bidireccional) y nula en las otras dos perpendiculares a ellas, que son hacia donde apunta la varilla de la antena. Pero si se mira desde un punto situado en la prolongación de la antena, como en la fig. 1.12 *(c)*, el gráfico se convierte en círculo (proyección del toroide), lo que indica que la directividad es la misma en todas las direcciones, o sea, que la antena es omnidireccional.

El gráfico normal de intensidad de campo de un dipolo horizontal es como se indica en la fig. 1.13, donde las flechas representan la directividad máxima. Este gráfico se llama a veces cosinusoidal, porque puede representarse mediante la fórmula $\cos \theta = E$ (intensidad de campo de los diversos ángulos), siendo E_{max} (en 0°) = 1.

Ganancia

Las antenas de propiedades directivas, entre las que se incluye el dipolo, se dice que tienen *ganancia*, que para los fines de las medidas suele relacionarse a veces con la antena isotrópica hipotética que se supone sin ganancia, puesto que radia por igual en todas direcciones. Por comparación con ella, la ganancia de un dipolo en la directividad máxima, tal como en la fig. 1.13, es de unos 1,64 dB o, para ser más exactos, de 1,64 dBi, indicando esta "i" la ganancia respecto a la antena isotrópica.

Sin embargo, el dipolo también se acepta como antena patrón y entonces su ganancia se considera de 0 dB. La mayoría de los fabricantes usan esta referencia, pero si quieren hacer aparecer mejor las prestaciones de una antena mencionan su ganancia respecto a una isotrópica. Por ejemplo, una antena del tipo yagi puede decirse que tiene una ganancia de 6 dB sobre un dipolo o de

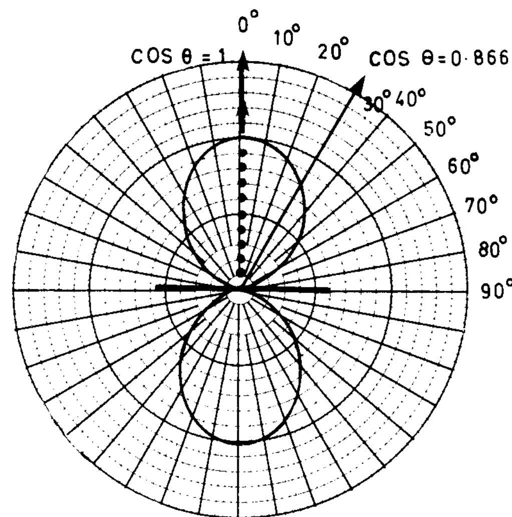


Fig. 1.13.– Radiación en diferentes ángulos desde un dipolo. A los lados de éste, dicha radiación vale aproximadamente cos θ, siendo la radiación máxima en 0° = 1.

7,64 dB sobre una isotrópica, las cuales deberían mencionarse como de 6 dBd (con la *d* de dipolo) y 7,64 dBi, respectivamente.

La ganancia de un sistema de antena sólo se consigue reduciendo el arco o arcos de su directividad, para lo cual hay que incrementar el número de sus elementos activos tales como los dipolos, caso en el cual la antena puede decirse que es un conjunto activo. La ganancia, que en realidad debería llamarse ganancia de directividad, puede obtener también empleando un reflector y uno o varios elementos directores, junto con uno o más radiadores activos, dipolos por lo general. A estos sistemas o conjuntos se les llama parásitos, ya que el reflector y los directores no son activos por lo general, es decir, no se excitan con la r.f. directamente.

Conjuntos directivos

Un método para conseguir ganancia y directividad es el de combinar la radiación de varios dipolos de media onda. La fig. 1.14 puede ayudar a aclarar las ideas. Supongamos que la corriente del dipolo A produce un cierto nivel de señal E en un determinado punto P, alejado de él. La misma corriente en cualquiera de los otros dipolos producirá asimismo igual nivel de señal en P. Por ejemplo, si los dipolos A y B son los únicos que funcionan, con una corriente I, la señal,en P será de $2E$; si funcionan A, B y C, el campo será de $3E$, y con todos los dipolos se tendrá $4E$.

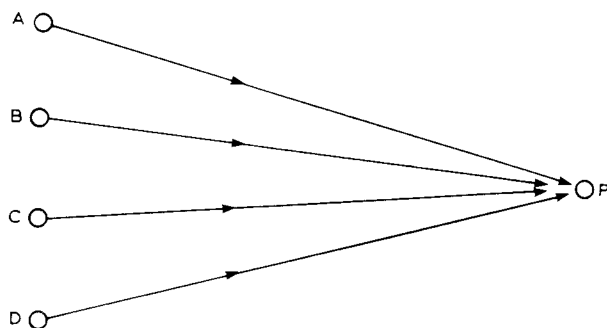


Fig. 1.14. – Las señales de todos los radiadores llegan en fase al punto de recepción P, por lo que el nivel de señal en él es el cuádruplo, o sea, 6 dB mayor.

Como la señal recibida en P es proporcional al cuadro de la intensidad de campo, la señal correspondiente recibida en P es de 1, 4, 9 y 16, según que sean uno, dos tres o cuatro los dipolos que funcionen. La ganancia de potencia es directamente proporcional al número de elementos usados y si uno solo de ellos produjese una ganancia de 1, o sea, 0 dB, los cuatro darían una de 4, que es 6 dB. De todos modos, hay que recordar que los campos de cada dipolo separado tienen que estar en fase en el punto de recepción y que la corriente de todos ellos tiene que ser idéntica. Los elementos han de estar lo suficientemente separados para reducir el acoplo entre ellos pues de lo contrario quedaría afectada la resistencia de radiación y demás parámetros.

Conjuntos parásitos

Son conjuntos de varios elementos, que contienen por lo menos uno activo, por lo general un dipolo, un reflector y varios directores que no están excitados y, por tanto, se clasifican como elementos parásitos. Estos elementos parásitos obtienen su energía mediante acoplo magnético con otro excitado (fig. 1.15). Uno de los conjuntos parásitos más usados es la antena "yagi", llamada así en honor de su inventor, el japonés Yagi. Es muy popular esta antena, porque, incluso las muy grandes pueden construirse y

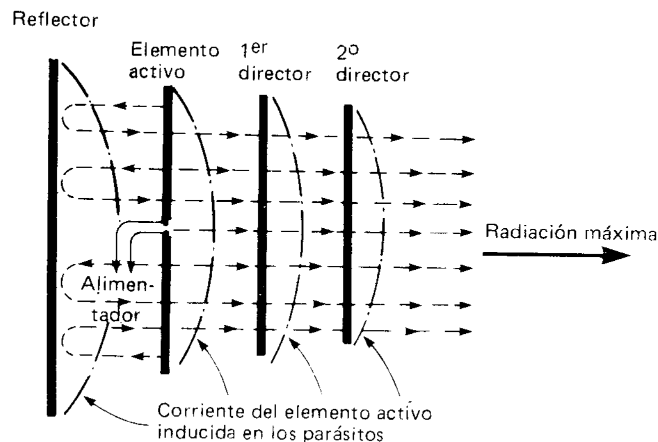


Fig. 1.15. Principio de un conjunto parásito.

adaptarse al alimentador con relativa facilidad. Las antenas yagi pueden construirse con sólo tres elementos o llegar hasta 1 para alcanzar ganancia respecto al dipolo de 14 ó 15 dB o incluso más. También pueden instalarse dos de ellas apiladas o colaterales (una sobre otra o una junto a otra), con el fin de tener una mayor

ganancia. Por lo general, esta ganancia suplementaria es relativamente pequeña, del orden de los 3 dB mayor que la conseguida con una antena sola.

Gráficos de radiación

Son los que indican la ganancia de directividad de una antena en todos los ángulos (360°), horizontal y vertical, expresada en coordenadas cartesianas o polares. Resultan muy útiles para los operadores de radio, ya que le dicen todo lo que ha de saber respecto a la cobertura de ésta. En la fig. 1.16 se dan los gráficos típicos de radiación de una antena yagi pequeña. En (a) se representa el campo horizontal en los 360°, viéndose en él por qué se necesita poder hacer girar físicamente las antenas de este tipo si se quiere conseguir el máximo de potencia de una dirección determinada. En (b) se indica la radiación según el ángulo vertical.

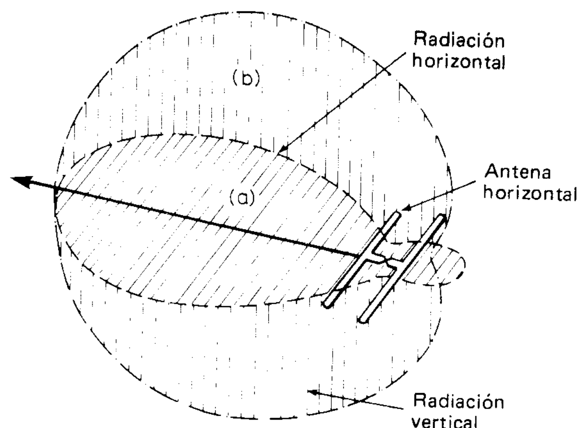


Fig. 1.16.– El gráfico de radiación horizontal no siempre es el mismo que el vertical, como sucede en esta antena de dos elementos, del tipo ZL especial (véase la fig. 5.10).

Tamaño de la antena

No suele considerarse que el tamaño de la antena es un factor importante de sus prestaciones. En recepción, cuanto mayor sea el área que la antena presenta al frente de onda que le llega, más fuerte será la intensidad de la señal recibida. Por ejemplo, un conjunto para 430 MHz debería presentar la misma área al frente de onda, para recibir el mismo nivel de señal que se obtendría de una similar que funcionase en 145 MHz.

Dicho de otro modo, la antena de 430 MHz tendría que ser físicamente mayor, lo que significa que es lógico un sistema apilado o colateral. Es algo así como afirmar que un jarro pequeño puede llenarse con la misma cantidad de agua que uno grande, pero que el menor ha de tener menos agua. Aunque en el ejemplo dado las dos antenas pueden tener la misma ganancia, la que sea mayor físicamente (la de 145 MHz) recoge más señal.

Capitulo 2

ANTENAS OMNIDIRECCIONALES

Las antenas omnidireccionales han alcanzado una gran popularidad con el crecimiento de los equipos móviles de comunicaciones y los repetidores, sobre todo porque estos últimos necesitan una antena que radie por igual en todas direcciones y las antenas verticales son más viables para las comunicaciones móviles.

El dipolo de media onda es la más sencilla de todas las antenas, pero ya no lo es tanto a la hora de alimentarla y utilizarla en VHF. La impedancia del punto de alimentación suele ser de 72 Ω y si la antena se quiere que funciene de un modo eficaz se necesita un alimentador bien equilibrado.

La mayoría de los transceptores de 2 m llevan la impedancia -ahora casi universal- de entrada y salida de 50 Ω. Esto hace que los dipolos queden casi automaticamente fuera de consideración, a menos que se hagan los arreglos necesarios para conseguir (a) una elevación de la impedancia de alimentación y (b) una alimentación simétrica-asimétrica. Al mismo tiempo, como el dipolo se alimenta en su centro, el cable de alimentación tiene que salir en ángulo recto con la antena, antes de doblarse hacia el transmisor, pues de lo contrario ocasionaría graves interferencias, a la vez que se reduciría el rendimiento. De todos modos, hay medios simples de alimentar un dipolo que sea excatamente igual de eficaz, sobre todo uno vertical.

El media onda adaptado en J

El método consiste en aplicar una "alimentación en el final", tal como se indica en la fig. 2.1, que se conoce como adaptación en J. Esta antena puede hacerse de hilo rígido (incluso un alambre de hierro galvanizado) o tubo fino (mejor, virtualmente en una pieza, y se sujeta por su base en el extremo de un mástil. El cable de alimentación puede ser coaxil de 50 Ω y puede salir ya directamente de la antena. No tiene mucha importancia que el alimentador sea simétrico, si se emplea el método de conexión indicado en la figura. Lo único que hace falta para conseguir el máximo de

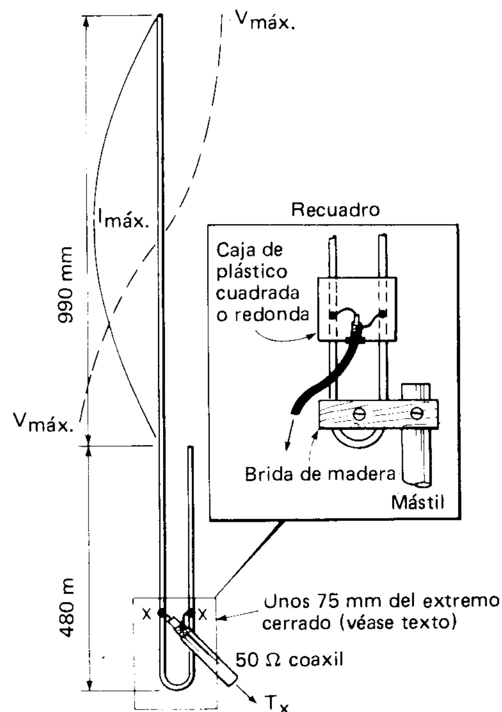


Fig. 2.1.– Construcción de una sencilla antena con dipolo de media onda y adaptación en J para servicio omnidireccional.

potencia alimentado a la antena, con una relación de ondas estacionarias (ROE) lo menor posible en el cable de alimentacion, es ajustar los puntos de alimentación (X), subiendo y bajando la conexión hasta encontrar los mejores, procediendo acto seguido a soldar los elementos conductores. Es esencial una caja de plástico que rodee el punto de conexión, con ei fin de impedir la entrada de agua de lluvia, pero no lleven el cable derecho a esa caja si quieren evitar que el agua entre en él, ya que lo estropearía.

Esta antena adaptada en J funciona según el principio de que el adaptador de cuarto de onda proporciona un alimentador de alta impedancia a la sección de media onda, es decir, que se trata de una alimentación en tensión.

Desde el extremo superior o abierto del adaptador la impedancia baja, reduciéndose, conforme llega al extremo cerrado o inferior, donde es cero.

Aunque esta antena está polarizada verticalmente, ya que opera de este modo, es también omnidireccional, pero, lo mismo que sucede con todos los dipolos verticales alimentados en su extremo, la radiación en ángulo recto con el suelo tiende a inclinarse hacia arriba, es decir, hacia el extremo de la antena.

Lo ideal es tener una radiación de ángulo vertical prácticamente paralela al suelo –partiendo de la antena–, que es lo que se consigue con una antena de fácil construcción, diseñada por el autor y denominada "Slim Jim".

La antena "Slim Jim"

Es una omnidireccional polarizada verticalmente, para 2 m, pero funcionará lo mismo en otras bandas de aficionado superiores o inferiores, sin más que calcular sus dimensiones de acuerdo con el caso. Su rendimiento de radiación es de 50 % mejor que el de una antena de plano terrestre, debido a su bajo ángulo de radiación, no abulta y no tiene plano de tierra, lo que hace que presente una baja resistencia al viento. ¿Y por qué se llama Slim Jim? Pues porque es fina (slim, en inglés y por usar una adaptación del tipo J, se tiene que J integrated match = Jim (adaptación integrada J). Esta adaptación facilita la alimentación de la antena en la base, solventando con ello los problemas de interacción entre alimentador y antena. La impedancia del alimentador es de 50 Ω.

La razón de que la Slim Jim sea mucho más eficaz que las populares antenas de 5λ/8 u otras con plano de tierra, a pesar de que éstas reivindican una ganancia de 3 dB sobre un dipolo, queda aclarada con el gráfico polar de la fig. 2.2. El ángulo vertical de radiación de la Slim Jim es casi paralelo al suelo, con lo que la radiación máxima se tiene donde se necesita: saliendo de la antena en su plano prácticamente, y todo alrededor de ella.

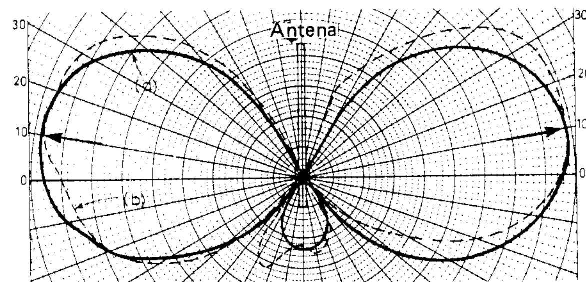


Fig. 2.2.– Gráfico de radiación vertical de la antena Slim Jim. (a) Teórico. (b) Obtenido con un prototipo de 2 m.

En los casos de planos de tierra, incluso los formados por radiales de una longitud de una onda completa, la radiación en ángulo vertical queda inclinada hacia arriba, con un ángulo de 30° ó más.

El gráfico sombreado de la fig. 2.3 es el correspondiente a una antena de 5λ/8 con plano de tierra provista de seis radiales de cuarto de onda. Compárese con el gráfico de línea llena del ángulo de radiación de la Slim Jim.

Examinemos ahora los gráficos horizontales (omnidireccionales) de la fig. 2.4, los dos con un ángulo vertical de 0°, o sea, paralelo al suelo. El gráfico interior representa la pérdida de radiación, por comparación, de una de 5λ/8 con plano de tierra, que es del

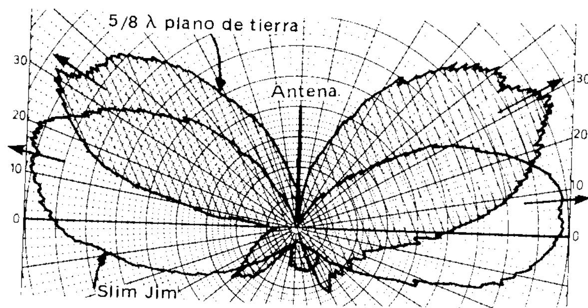


Fig. 2.3.– Radiación en ángulos verticales de una Slim Jim (línea llena) y otra con plano de tierra, de 5 λ/8 (zona rayada). De modelos a escala de gamas de antena de 650 MHz.

orden de 6 dB. Esto se ha comprobado con antenas de 2 m de tamaño natural, así como con modelos a escala para UHF, en el equipo de prueba del autor (véase el capítulo 5).

Cómo funciona la Slim Jim

Básicamente no es más que un dipolo plegado alimentado en su extremo, que trabaja verticalmente, con las distribuciones de corriente y tensión indicadas en la fig. 2.5 (a). El adaptador proporciona una alimentación de baja impedancia (50Ω). Como en todos los dipolos plegados, las corrientes de cada rama están en fase, mientras que en el adaptador lo están en oposición, por lo que desde éste no se produce radiación alguna, o si la hay es en muy escasa proporción.

Con una buena adaptación, la relación de ondas estacionarias será mucho menor de 1,5 a 1, y en ese valor se conservará en toda la banda (fig. 5.2).

La antena puede construirse de muchas maneras, tanto para usarla en estaciones fijas como para trabajo móvil. Se ha utilizado en este último, montada en un mástil corto unido al parachoques posterior, y, como en el barco de vela G2BCX/MM Frith 2,

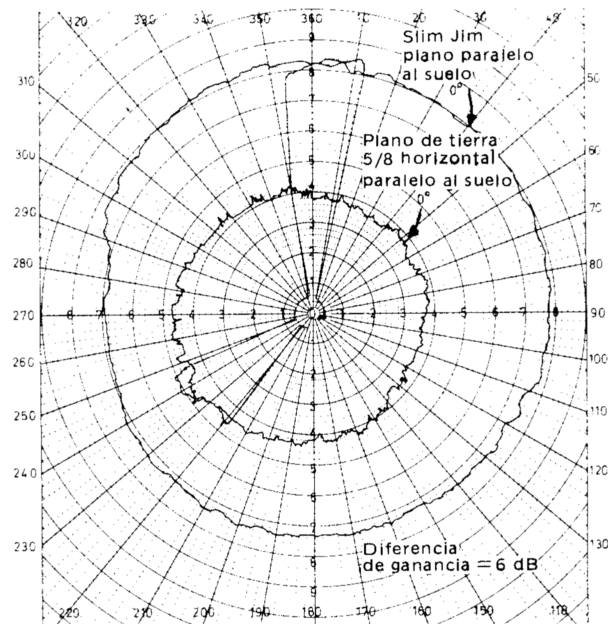


Fig. 2.4.– Gráfico de radiación horizontal de una Slim Jim, comparado con la de plano de tierra de 5 λ/8, en 0°, paralelo al suelo. La diferencia de ganancia en este ángulo es de 6 dB. Gráficos de modelos de 650 MHz.

en una versión especial, completamente encerrada en plástico, para protegerla contra el agua marina.

Construcción

La Slim Jim puede construirse con tubo de aluminio de 6,3 ó 9,5 mm de diámetro, o con hilo rígido galvanizado, o con cable de cinta paralelo de 300 Ω. La separación entre los elementos paralelos no es crítica, como tampoco lo es en su longitud total, siempre que la tolerancia se mantenga dentro de 6 mm. La

Fig. 2.5.– Construcción de la Slim Jim y distribución de la corriente y la tensión en ella.

conexión del alimentador puede protegerse contra los agentes atmosféricos mediante una cajita de plástico, a la que se sujetará un soporte pequeño de madera para su unión al mástil. Entre

la mitad de retorno del radiador plegado y la parte superior de uno de los lados del adaptador se incluirá un aislamiento, que puede ser un trozo de perspex agujereado para permitir la sujeción de los elementos (que no se tocarán), los cuales se fijarán con un adhesivo fuerte. Si el tubo de aluminio tiene paredes gruesas puede agujerearse para la sujeción, usando para ello un aislador circular hecho a propósito con tornillos *ad hoc*.

El punto de alimentación –donde se hace el contacto del dipolo con el adaptador– puede protegerse contra la lluvia, tal como se representa en la fig. 2.6, mediante una caja de plástico provista de tapa. De todos modos, antes habrá que hallar el punto correcto

Fig. 2.6.– Puntos de alimentación. Ajusten las conexiones de X hasta conseguir una ROE mínima y una potencia mdxima en la antena (véase el texto).

de conexión. Una vez terminada la construcción de la antena y erigida junto al transmisor, pero alejado de cualesquiera otros conductores, se utilizará la longitud necesaria de alimentador para llegar a la antena cuando ya esté *in situ*. Pongan pinzas de cocodrilo en los extremos del cable coaxil, una en el conductor central y otra en la funda. Muerdan la antena aproximadamente a 75 mm desde su parte inferior (fig. 2.6) y vayan ajustando, subiendo o bajando, hasta encontrar el punto en que se consiga el mínimo ROE y la máxima potencia. Marquen los puntos de alimentación y pongan en ellos terminales para soldar, tal como se indica, que permitan unir después las conexiones del alimentador.

Ya puede colocarse la caja de plástico. Se recomienda que una vez terminada la antena y su conexión, se les aplique a todos los elementos expuestos a la intemperie –incluida la caja de plástico– una capa de barniz protector o dos.

En la fig. 2.7 se indica un método de montaje en mástil, con una brida de antena de TV. La antena puede reforzarse con un puente de material aislante por el estilo del perspex entre los dos elementos, como se ve en la fig. 2.5 (b).

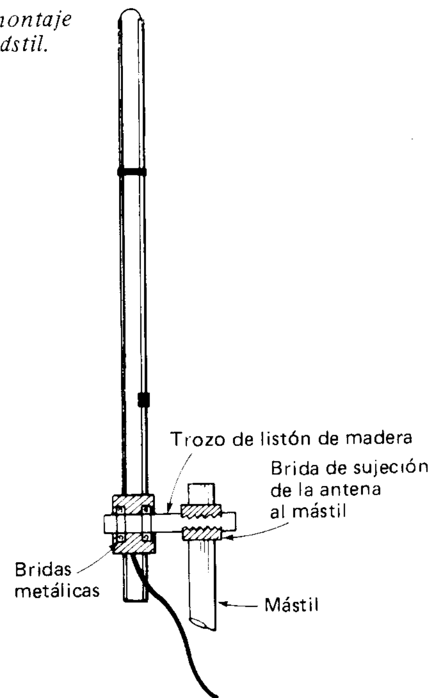
En principio, la antena debe situarse lo más alta posible y alejada de otros conductores, pero funcionará perfectamente en interiores, en buhardillas e incluso en salas de estar, aunque con menor alcance en esos casos.

La Slim Jim 2BCX puede construirse también con hilo de hierro galvanizado o cable de alimentador paralelo de 300 Ω. La longitud sigue siendo la misma, así como el punto de ajuste. La separación entre los elementos puede reducirse a unos 25 mm. La antena así constituida puede alojarse en un trozo apropiado de tubo plástico de los utilizados en las conducciones de agua. Si se hace con cable de 300 Ω, la longitud es la misma y no se necesita el aislador: basta con cortar unos 25 mm de hilo en ese punto y hallar el lugar óptimo de alimentación.

Antenas con plano de tierra

Todas las antenas de cuarto de longitud de onda con respecto a la frecuencia de funcionamiento se consideran resonantes y

Fig. 2.7.– Método de montaje de la Slim Jim en un mástil.



tienen una impedancia de alimentación relativamente baja si el punto de alimentación se encuentra en la base, o sea, en el extremo de la antena más cercano al suelo. Una antena de este tipo radia por igual en todas direcciones y es pues omnidireccional, y suponiendo un suelo perfectamente conductor como en la fig. 2.8, el ángulo vertical de radiación es muy bajo, hasta el punto que la radiación se efectúa casi paralela al suelo. Pero esa antena presentaría unos inconvenientes considerables en VHF, dado que al nivel del suelo e incluso con una tierra perfectamente conductora bajo ella, la radiación quedaría absorbida rápidamente por las estructuras aledañas (edificios, árboles, etc.)

De todos modos, la tierra real está muy lejos de ser un conductor perfecto, por lo que se produciría una pérdida considerable de

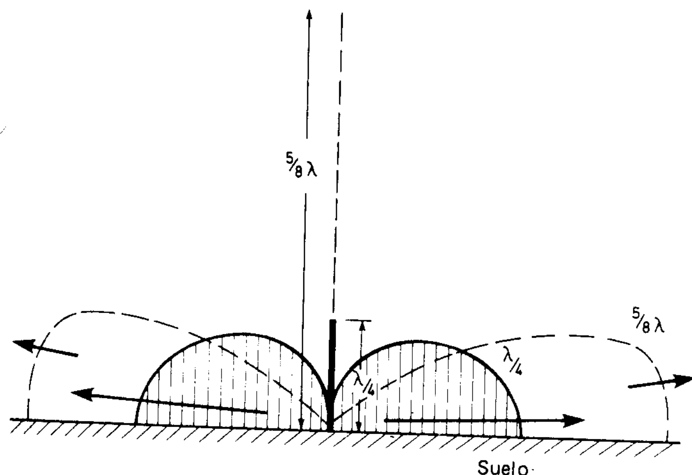


Fig. 2.8.– Radiación de una antena vertical de cuarto de onda al nivel del suelo, comparada con la de otra, vertical también, de 5 λ/8 que en teoría, aunque no necesariamente en la práctica, consigue una ganancia de unos 3 dB.

la potencia radiada. Por eso la única solución consiste en proveer una tierra "artificial", de material muy conductor, debajo de la antena, para reducir las elevadas pérdidas que originaría la real, de lo contrario. Esta le permitirá a la antena radiar con ángulos verticales relativamente pequeños, y si el sistema se eleva todo lo posible, la atenuación debida a las estructuras antes mencionadas queda suprimida en muy gran parte, aumentándose con ello el horizonte y, por tanto, la distancia útil de trabajo.

Antena de 5λ/8 con plano de tierra

Una de las antenas omnidireccionales más populares, aunque no por ello sea la más eficaz, es la llamada de 5λ/8 con plano de tierra, que para trabajos fijos suele consistir en la propia antena montada en un sistema de varillas metálicas (radiales) que forman en conjunto una tierra "artificial" o plano de tierra, como ya se ha dicho. Esta antena sirve asimismo para trabajo móvil, caso en el cual va montada en el techo o en otra parte del automóvil, que actúa como plano de tierra.

Se llama de 5λ/8 porque tal es aproximadamente su longitud física. La eléctrica es de tres cuartos de longitud de onda, pero, como demuestra la distribución de la corriente y la tensión a lo largo de ella (fig. 2.9), la primera sección es eléctricamente un cuarto de longitud de onda (aunque físicamente sea de un octavo aproximadamente, como consecuencia de la bobina de carga). La impedancia en el punto de alimentación es de unos 50 Ω.

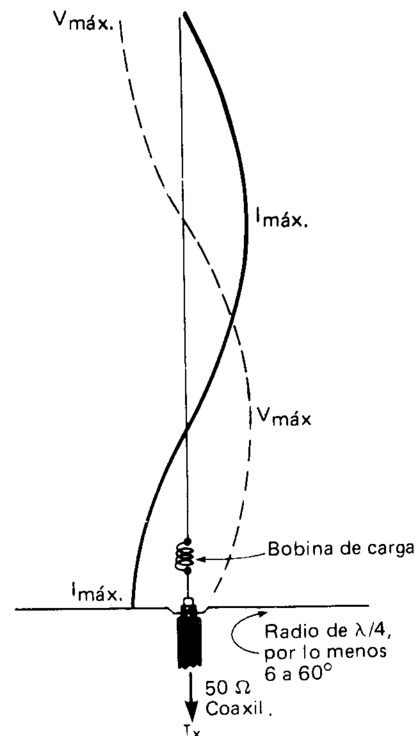


Fig. 2.9.– Principio de la antena de 5 λ/8 con plano de tierra.

Su construcción no presenta dificultad alguna, y tanto la antena como su sección radial pueden hacerse de tubo de aluminio o cobre, hilo rígido como el de los electrodos de soldadura o incluso con una percha para la ropa, enderezada. La estructura metálica de un paraguas viejo también sirve como plano de tierra eficaz (y, si hace falta, plegable), como veremos más adelante. La bobina de carga consta de 4 espiras de hilo de 1,63 mm de diámetro, devanadas en una forma de paxolín o PTFE de 18 mm de diámetro, y la parte superior de la antena se hace ajustable, con el fin de permitir la resonancia y un bajo ROE. En la fig. 2.10 se da un esquema de la construcción de esta antena.

Por lo general no habrá necesidad de ajustar la longitud del cable alimentador de 50 Ω, como suele hacerse equivocadamente, y con el radiador bien ajustado la ROE deberá ser por lo menos de 1,1 ó 1,2. Con una potencia de 10 W aplicados a la antena deberá poderse iluminar en tubo pequeño fluorescente de 6 W, 220 V, en los puntos de tensión marcados (X).

Un método de construcción de la bobina de carga y el conjunto radial se da en la fig. 2.10 (b). Estos radios no deberán medir menos de 508 mm de largo, y aunque con cuatro se tiene el mínimo necesario, será mejor usar seis. La placa de montaje puede ser de cobre, latón u hojalata lo suficientemente gruesa para aguartar los radios que se le van a soldar o atornillar. No doblen éstos hacia abajo para conseguir una baja ROE. Si no la pueden obtener ajustando la longitud del radiador, es probable que la causa radique en una mala impedancia del alimentador o un fallo de adaptación en el extremo del transmisor.

El ajuste de la resonancia puede efectuarse con la antena a baja altura, pero lejos de otros conductores, y si se va a usar en exteriores conviene asegurarse de que no puede entrar agua por el extremo abierto del cable coaxil, donde se junta con la bobina y termina la funda exterior. Tapen todo bien con Sealastic o cualquier otro producto sellador. La bobina puede recubrirse con cinta adhesiva de cloruro de polivinilo (cinta aislante para electricistas) y a la antena y la bobina se les aplicará, una vez terminadas, una o dos capas de barniz de poliuretano o similar, para protegerlas contra la intemperie.

Esta antena es también muy apropiada para trabajo móvil, aprovechando la carrocería del coche como plano de tierra. El

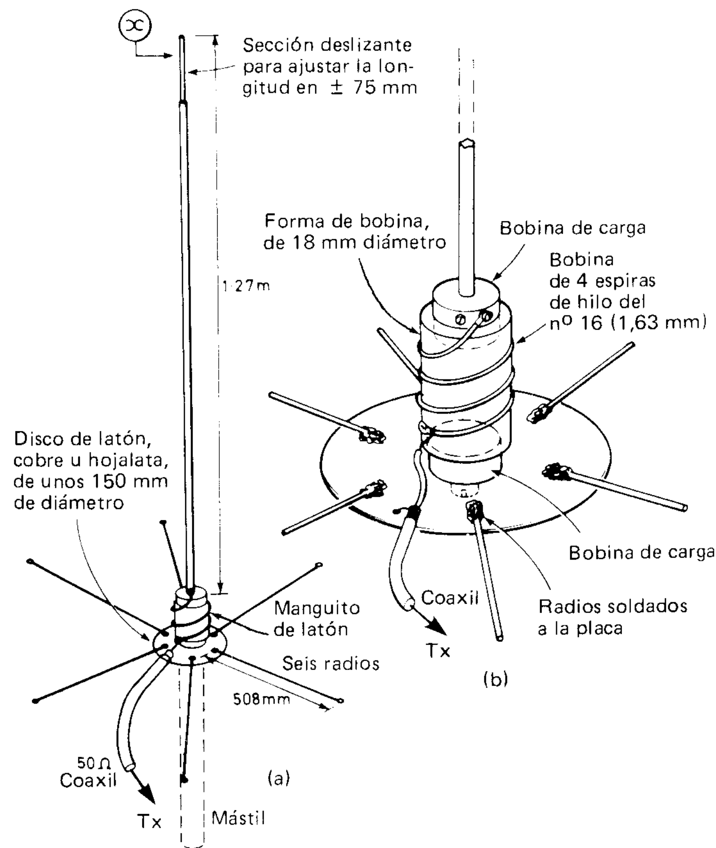


Fig. 2.10.– (a) Dimensiones para la construcción de una antena de 5 λ/8 con plano de tierra. (b) Detalles de la bobina de carga y el conjunto radial de esa antena.

montaje en el centro del techo es el mejor, pero la bobina de carga tiene que aislarse de la estructura metálica del coche. El alimentador de 50 Ω es el mismo, excepto en que la funda apan-

talladora se conecta a la carrocería del coche, en lugar lo más cercano posible a la base de la antena.

Plano de tierra con un paraguas

Como ya se ha dicho, la estructura de un paraguas viejo, desprovisto de la tela, constituye un plano de tierra excelente para el trabajo en 2 m. Las varillas deberán conectarse entre sí utilizando para ello la funda exterior de un trozo de cable coaxil viejo, ya que el contacto eléctrico entre ellas es bastante malo.

Usando el radiador de 5λ/8 y la bobina de carga de la fig. 2.11, el plano de tierra formado por el paraguas será una antena portatil muy útil, sobre todo si se hace que el radiaro sea desmontable. El plano de tierra puede plegarse. Para su uso portátil, todo cuanto se necesita es un mástil ligero. La disposición utilizada por el autor es la indicada en la fig. 2.11, y con ella situada en lugar despejado, pero a una altura de sólo 4 m, se han conseguido enlances considerables a larga distancia en condiciones de propagación troposférica.

Nota: El plano de tierra de 5λ/8 tiene una ganancia aproximada de 3 dB sobre un dipolo, pero *únicamente* con el ángulo óptimo de radiación en el plano vertical, como ya se ha dicho en la fig. 2.3. y el texto correspondiente.

Antenas colineales

Son de las pocas que en polarización vertical son omnidireccionales, que pueden proporcionar una buena ganancia sobre un dipolo y que no son muy dificiles de construir. Hay varias colineales ya disponibles en el comercio para 2 m, pero las afirmaciones referentes a su ganancia deben tomarse con reserva. Por ejemplo, la especificación puede indicar "ganancia de 10 dB" (que no quiere decir nada, a menos que se dé una referencia), pero puede ser respecto al radiador isootrópico, antena hipotética que se considera sin ganancia alguna y se utiliza como referencia de 0 dB. La antena de referencia patrón de 0 dB para la medida de ganancia es el dipolo en el espacio libre (que tiene una ganancia de 1,64 dB sobre la isotrópica), pero antes vamos

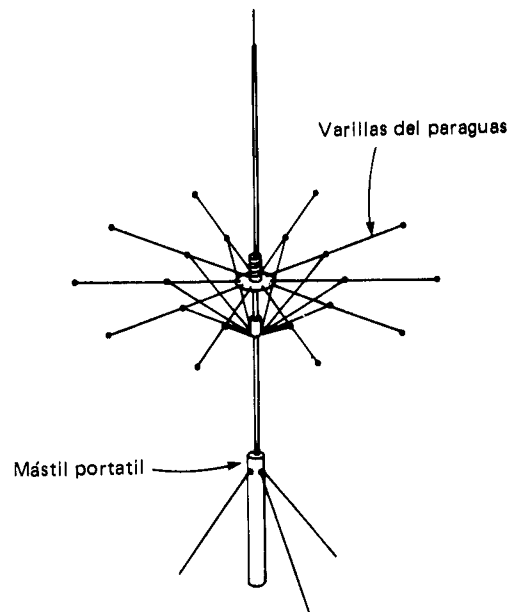


Fig. 2.11.– Un paraguas viejo puede constituir un excelente plano de tierra para servicio portátil, utilizado en unión del radiador descrito en la fig. 2.10 y un mástil de pequeña sección.

a ver qué ganancia real se puede conseguir con los sistemas colineales y también cómo funcionan.

Un conjunto colineal simple consta de dos radiadores de media onda colocados de manera que funcionen "en fase", lo que hace que la potencia radiada total sea de 1,5 veces aproximadamente la de un dipolo simple; es decir, que la ganancia de potencia es de unos 2 dB. La configuración física de una colineal de dos elementos, junto con la distribución de la tensión y la corriente, se dan en la fig. 2.12 (a). Pueden usarse más elementos, para conseguir una ganancia superior, y con el sistema de elementos muy juntos

clásico se conseguirán unos 3,2 dB con tres y unos 4,3 dB con cuatro. Más de cuatro elementos rara vez se usan, ya que el aumento de la ganancia no compensa. Puede conseguirse un aumento de dicha ganancia separando los elementos más, hasta el punto que con una separación de 0,4 λ se puede llegar a una ganancia de más de 3 dB con sólo dos elementos, pero en ese caso resulta muy difícil conseguir una buena adaptación de la alimentación y la fase con cable de 50 Ω (o de 75).

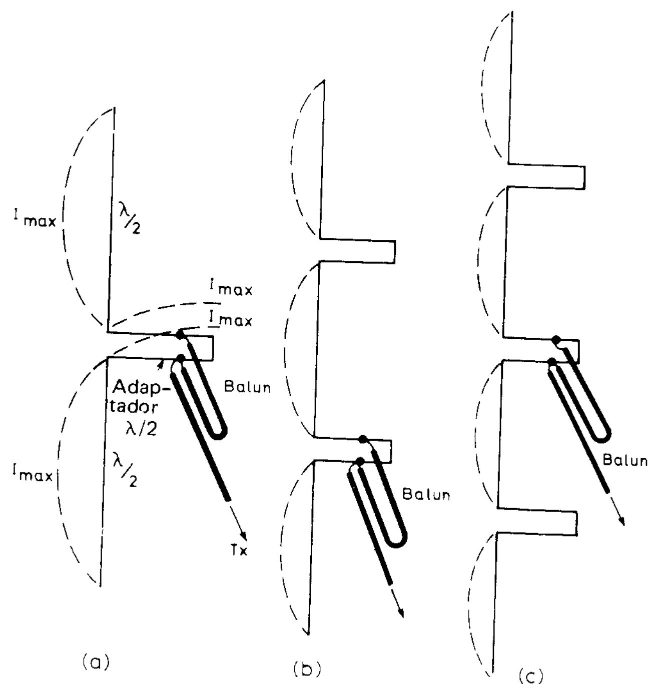


Fig. 2.12.– (a) Antena colineal de dos elementos; (b) colineal de tres elementos; (c) colineal de cuatro elementos. La distribución de las corrientes se indica con límeas de trazos.

El sistema de elementos más juntos es mejor desde el punto de vita constructivo y de la alimentación. El ángulo vertical de radiación de una antena colineal de dos elementos es el que se representa en la fig. 2.13, pero, como todas las antenas de VHF, necesita estar alta: cuanto más, mejor.

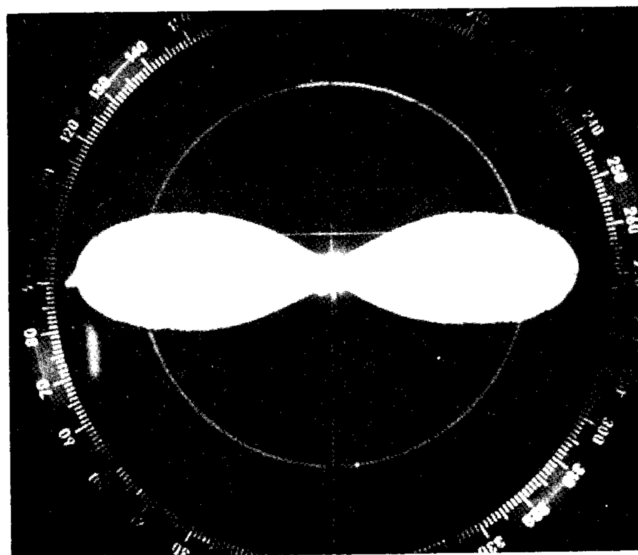


Fig. 2.13.– Radiación vertical de una antena colineal de dos elementos. La radiación horizontal es similar.

Construcción

En primer lugar, la antena deberá estar bien aislada del mástil o cualquier otro soporte, dado que los extremos de los elementos se encuentran a un elevado potencial de r.f., lo que significa que el aislamiento entre los elementos tiene que ser también muy bueno.

Los elementos y adaptadores de alimentación pueden hacerse de cobre de gran diámetro, pero esto exigiría soportes aislantes extras. Es mejor utilizar tubo de latón o aluminio, que al mismo tiempo resulta autosoportante. Los tubos de PTFE o material similiar de bajas pérdidas se pueden usar para unir elementos livianos, aunque también puede emprenderse la tarea de hacer un trabajo de "fontanería" con tubo de cobre de 12 ó 15 mm de diámetro, del usado para tuberías de agua, y las piezas necesarias para matenerlos unidos. El autor ha construido una buena cantidad de colineales utilizando todos los materiales mencionados, pero el éxito depende muchas veces en gran parte del ingenio en el aprovechamiento de los materiales de que se dispone.

Alimentación y adaptación

Pero antes de entrar en detalles constructivos convendría que examinásemos el método de alimentar una antena colineal con un cable coaxil de 50 ó 75 Ω. Como los elementos radiantes tienen que estar en fase, van conectados por medio de trozos de cuarto de onda y todo el sistema es susceptible de poder ser alimentado en un punto apropiado de esos trozos o adaptadores. Pero el cable coaxil proporciona una alimentación asimétrica, que deberá corregirse empleando un transformador simétrico/asimétrico ("balun"), tal como se indica en la fig. 2.14, con el que se puede conseguir además una razón de impedancia aproximada de 4:1, o sea, unos 200 Ω, así como una conexión simétrica.

Siempre que los elementos sean resonantes y los adaptadores bien construidos, podrá obtenerse una buena adaptación y una baja ROE encontrando el punto correcto de derivación en el adaptador, donde conectar el alimentador y el transformador asimétrico/simétrico. En la fig. 2.12 se dan las configuraciones de colineales de 2, 3 y 4 elementos.

Una colineal de dos elementos

Este tipo de conjuntos suele llamarse a veces "la delicia de los fontaneros", ya que todos sus elementos y adaptadores están hechos con trozos de tubo de cobre unidos con sus accesorios correspondientes (codos, por lo general). Tengan en cuenta que para soldar los accesorios se necesita una lamparita.

La antena es autosoportada y puede montarse en la cúspide de un mástil metálico por medio de una unión en T incluida en la rama inferior del adaptador y acoplada al mástil con un trozo de tubo de PVC (cloruro de polivinilo). Con este fin se pueden conseguir acoplos adecuados en el comercio del ramo de la fontanería. En la fig. 2.14 (a) se dan las dimensiones de la antena, mientras que la fig. 2.14 (b) es un detalle del transformador simétrico/asimétrico. El ajuste se hará en los puntos (X) hasta conseguir la radiación máxima, valiéndose para él de un medidor de intensidad de campo, un vatímetro serie, una lámpara fluorescente o de neón, etc. Asimismo deberá comprobarse que la relación de ondas estacionarias no es superior a 1 ó 1,2. Los ajustes pueden hacerse con una señal que se reciba, ajustando a la lectura máxima del medidor de señal.

El bucle de alimentación del *balun* es efectivamente de una longitud de media onda, pero como consecuencia del factor de velocidad del cable coaxil (que es el mismo que se emplea para el propio alimentador) será algo menor físicamente, con un promedio de 712 mm. La fórmula siguiente, que es muy sencilla, nos dará la longitud exacta del tipo de cable coaxil utilizado (por ejemplo, UR43, UR67, etc.):

$$\text{longitud (m)} = \frac{150 \text{ x factor de velocidad del cable}}{145 \text{ MHz}}$$

Los puntos de derivación en el adaptador estarán alrededor de los 150 mm del extremo cerrado.

Una Slim Jim colineal

Esta antena se ha probado como modelo a escala en 650 MHz y como versión de tamaño natural en 145 y 430 MHz, y es una ampliación de la Slim Jim ya descrita. Con cualquier sistema colineal poco separado de elementos simples, la ganancia del sistema sobre un dipolo es de unos 2 dB, pero el uso de elementos de dipolo plegado permite una ganancia cercana a los 3 dB.

El principio de funcionamiento es el mismo que el de la Slim Jim de un solo elemento, pero además en este caso se tiene un ra-

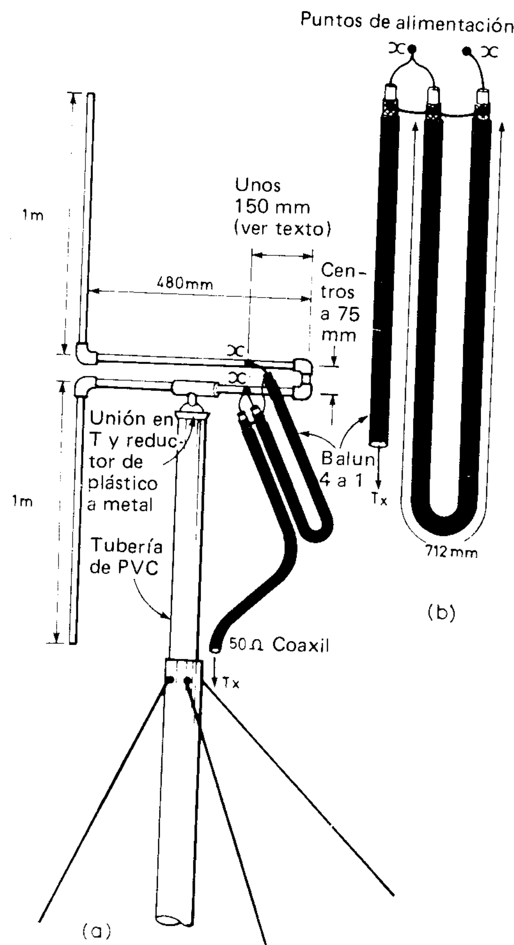


Fig. 2.14.– (a) Construcción de una antena colineal de dos elementos con tubo de cobre para fontanería y sus accesorios. (b) Detalle del adaptador simétrico-asimétrico (véase el texto).

diador extra acoplado por medio de dos trozos de λ/4, con lo que los dos elementos funcionan en fase, como en la fig. 2.15. Por cuanto se refiere a la construcción de la antena, remitimos a los lectores a las figs. 2.5 y 2.6, ya que lo único que hay que añadir es hacer que el sistema sea autosoportante, probablemente con un tubo de 9 mm o incluso de menor diámetro, o con hilo de cobre de 1,63 mm de diámetro dispuesto en una armazón ligera de madera, sobre aisladores.

Para conseguir la resonancia en 145 MHz es probable que haya que recurrir a hacer el elemento superior algo más corto de λ/2 x 0,95, que es la longitud del inferior. El adaptador de base o excitador es de 480 mm de largo, pero las longitudes de los dos de puesta en fase puede haber que hallarlos experimentalmente, utilizando barras ajustables de acortamiento en cada extremo y efectuando los ajustes de modo que se obtenga la menor relación de ondas estacionarias (ROE), o sea, un valor de 1,5 a 1. La longitud óptima de tales adaptadores será: (a) de unos 468 mm y (b) de 456 mm, con el elemento doblado de la parte superior de unos 960 mm de largo, ajuste que también se puede hacer con una barra móvil de acortamiento colocada en la parte superior, para conseguir la resonancia exacta. Una vez ajustadas las longitudes de los adaptadores, podrán rehacerse en bucles, tal como se indica con líneas de trazos en la fig. 2.15, aunque sólo sea para que la antena quede menos "religiosa".

Trabajos móviles y portátiles

Hay muchas antenas comerciales móviles para trabajar en 2 m, la mayoría de las cuales son de los tipos de λ/4 ó 5λ/8, para montaje lateral o en techo. Tal vez la más eficaz sea la de 5λ/8, montada en el centro del techo, de manera que éste mismo actúe de plano de tierra. Las antenas montadas en los lados, delante o detrás no resultan tan eficaces como consecuencia de la zona irregular del plano de tierra que se forma, así como su proximidad a otras partes del cuerpo del coche y el propio suelo. También es muy importante que la antena proporcione el máximo de potencia radiada, para lo cual la parte exterior del cable (la pantalla) deberá doblarse en el punto en que se ha colocado la antena.

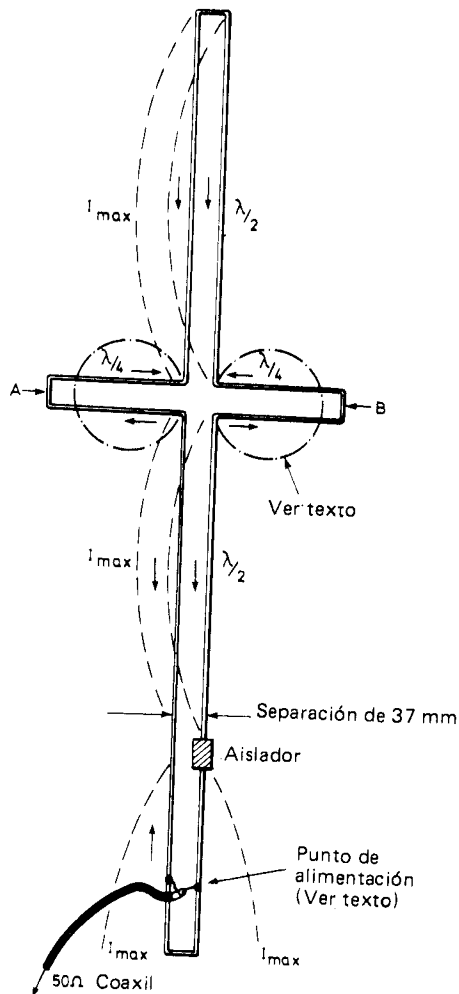


Fig. 2.15.– La antena colineal Slim Jim, apropiada para funcionar en 2 m o en 70 cm (véase el texto).

Los montajes magnéticos, por ejemplo, no siempre proporcionan una conexión de tierra lo suficientemente baja para el cable y a veces hasta llega a no haber conexión, siendo entonces la única tierra que el cable "ve" la capacidad entre el montaje magnético y la carrocería del coche, con la pintura actuando como dieléctrico. Las antenas de λ/4 montadas lateralmente no sólo son ineficaces en cuanto a la potencia eficaz radiada, sino que al mismo tiempo quedan más apantalladas por el propio coche de lo que serían las mucho más largas de 5λ/8, en las que la parte superior que lleva corrriente es mucho más probable que quede libre de la carrocería. Las antenas de auto-radio adaptadas tampoco resultan muy eficaces por la misma causa.

No hay ninguna antena "especial" para trabajo móvil que proporcione a la vez ganancia y cobertura omnidireccional, excepto la 5λ/8, que se supone de 3 dB más de radiación que un dipolo, pero que realmente no es así en ángulos verticales cercanos al suelo, o sea, entre 0 y 30°. Con el tipo de λ/4m la mayoría de la potencia se radia hacia arriba, a menos que esté montada en el centro del techo. Una colineal de dos elementos montada en el parachoques podría ser una solución para los que no quieren que sobresalga mucho, pero no es así, porque la antena queda muy cerca del suelo real en ese caso. Ello no obstante, hay una forma de colineal que el autor ha usado con buenos resultados: se trata de una de 3λ/4, en la que la primera sección de λ/4 funciona en la misma fase que la de λ/2 que está encima de ella (fig. 2.16, *a*). Con una antena de 5λ/8 su parte inferior, de λ/4, es decir, la bobina de carga más el elemento, funciona en oposición de fase con la principal de λ/2, con lo que se pierde una pequeña cantidad de radiación en ángulos verticales muy grandes. Poniendo las dos secciones de la antena en fase se asegura que toda la radiación vaya en una dirección, que teóricamente es paralela al suelo. Pero la zona del plano de tierra proporcionado por la parte superior de un coche grande tiene en este caso, como en las demás antenas el inconveniente de no ser lo suficientemente grande para consevar la radiación en ángulos muy pequeños.

Para los que puedan querer probar la colineal de 3λ/4 como alternativa de la 5λ/8, se dan los detalles correspondientes en la fig. 2.16. El adaptados de fase (c) se puede bobinar (d) y (e), con lo cual la antena podrá quedar de dimensiones bastante reducidas. Podrá alimentarse directamente con cable coaxil de 50 Ω, pero

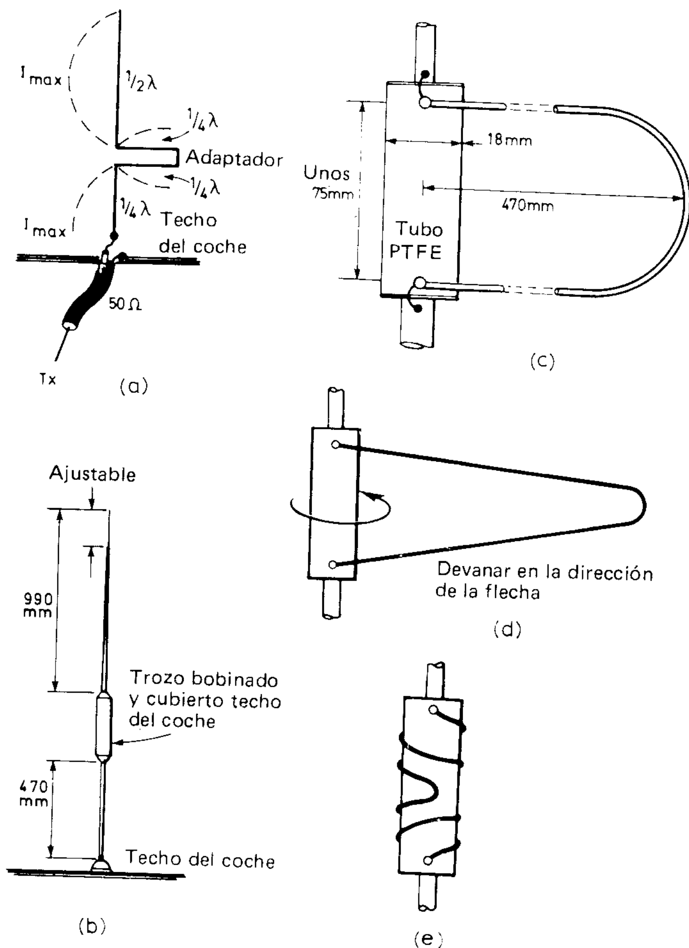


Fig. 2.16.– Detalles para la construcción de una antena colineal de tres cuartos de onda para servicio móvil. (a) Distribución de la corriente; (b) construcción que se recomienda; (c) primer montaje del elemento de puesta en fase; (d) antes de bobinar éste en la forma; (e) con éste ya bobinado.

probablemente necesitará algún ajuste en su longitud, en la sección superior y el adaptador devanado, para conseguir una ROE baja. Esta antena puede usarse también con un plano de tierra clásico.

Antenas para transceptores de mano

Las antenas que se entregan con los transceptores portátiles, o que a veces se hacen con ellos, son tal vez las más eficaces que pueden usarse para el fin propuesto. Hay poca diferencia entre una de varilla de λ/4 y los tipos pequeños helicoidales utilizados en ocasiones. La radiación de estas antenas es hacia arriba, es decir, siguiendo la dirección de la propia antena, y sólo podrían dirigirse más hacia el horizonte empleando un plano de tierra que, lógicamente, echaría por tierra la característica más importante de estos aparatos, como es su portabilidad en la mano.

Antenas para servicio en aparatos portátiles

Prácticamente todas las antenas pueden usarse para funcionamiento portátil en lugares fijos temporalmente, como pueden ser, por ejemplo, las utilizadas en vacaciones o en días de trabajo en el campo. El que la antena sea de un tamaño razonable y fácil de transportar son las condiciones esenciales. La construcción de una antena, que de otro modo sería de un tamaño físico considerable, es simplemente asunto de ingenio, para doblarla o reducirla a secciones que después se juntan para funcionar. Las antenas pequeñas por el estilo de la ZL Special, versión de dos elementos, y la HB9CV, encajarán perfectamente en el maletero de cualquier coche. También pueden conseguirse yagis de varios elementos, con charnelas en el vástago o dividiendo éste en trozos, de manera que el reflector y los elementos excitados queden en uno y cada dos o tres directores en otros.

El plano de tierra de paraguas ya descrito en la fig. 2.11 también constituye en sí una antena portátil, y en lugar de un elemento radiante de 5λ/8 podría usarse otro de 3λ/4, como el descrito en la fig. 2.16. Otra direccional que puede partirse en secciones es la Slim Jim o su versión colineal (figs. 2.5 y 2.15).

Un mástil portátil y ligero puede conseguirse, por ejemplo, con trozos de 1 m de palos de escoba de 25 mm de diámetro, unidos

con manguitos metálicos y sujetos con tres o cuatro hilos de nilón al suelo para darle estabilidad. Cuatro o cinco secciones serían tal vez el límite para la erección de un mástil de este tipo.

Otras antenas omnidireccionales

Para funcionamiento omnidireccional con polarización *horizontal*, la antena de "halo" es quizá la mejor conocida y en la fig. 2.17 se dan detalles de su construcción. Sirve perfectamente para trabajo móvil en banda lateral única (BLU), donde los operadores suelen usar antenas de polarización horizontal, con lo que se aumenta bastante el alcance.

El dipolo de manguito es también otra antena vertical simple, pero no resulta muy eficaz. Una mejora de ella es un trozo coaxil alimentado en media onda, aunque la de media onda con alimentación en J o la Slim Jim son prácticamente tan eficaces. En el *ARRL Antenna Handbook* se describe una colineal construida con trozos de cable coaxil, pero es muy difícil de construir y, además, de manejar de modo eficiente. A la vez, exige apoyo exterior por medio de un mástil de madera o plástico, o colocándola dentro de tubería de plástico.

Para conseguir radiación omnidireccional con polarización horizontal se dispone también de los sistemas de dipolos cruzados, la antena de molinillo, el bucle horizontal, similar a la de halo ya mencionada, la hoja de trébol, que consta de cuatro antenas pequeñas de bucle horizontal alimentadas con un solo cable coaxil, y la de cuadro o "Alford", que consta de cuatro elementos de cuarto de onda alimentados de manera que la fase de la corriente en cada uno de ellos sea la misma. Estas antenas no son de construcción difícil y la información referente a su diseño podrá encontrarse en la bibliografía incluida al final del libro.

Antena de halo

El halo se usó en otro tiempo mucho para trabajos móviles cuando la mayoría de las emisiones y recepciones se efectuaban con antenas polarizadas horizontalmente. Todavía puede ser una antena omnidireccional útil para funcionamiento en banda lateral única. El halo es en realidad un dipolo formado en circunferencia

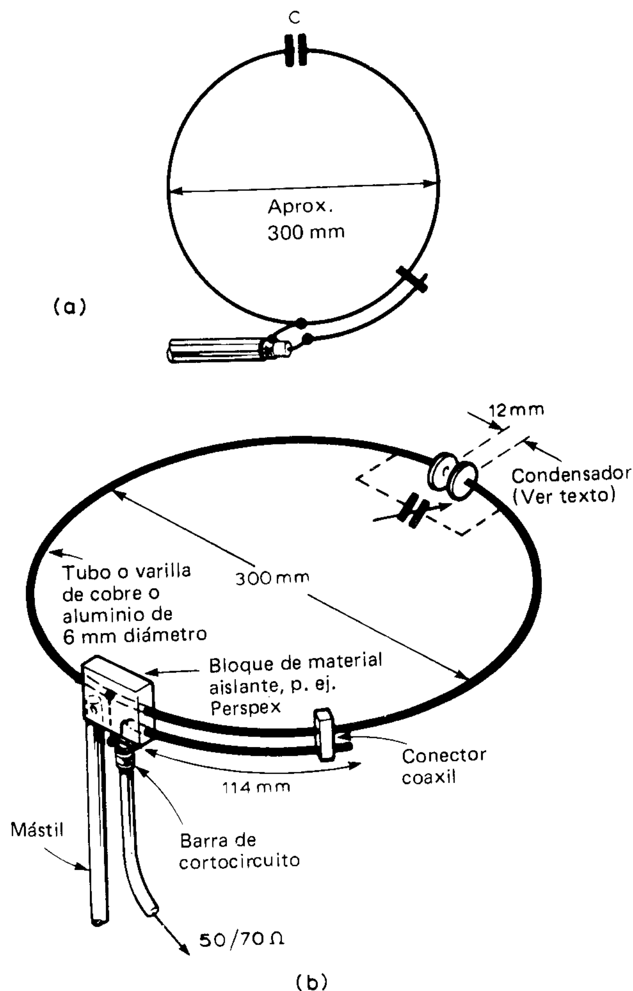


Fig. 2.17.– Detalles para la construcción de una antena de halo (veáse el texto en cuanto a los detalles del ajuste).

y con adaptación en gamma de cable coaxil de 50 a 70 Ω. Como se ve en la fig. 2.17, el diámetro del aro es de unos 30 cm y la longitud de la sección de gamma, de unos 114 mm. La adaptación se obtiene desplazamando la barra de cortocircuito de gamma a la vez que se sintoniza con el condensador, ajustándose ambos a la ROE mínima.

Para los ajustes iniciales puede usarse un condensador variable de unos 50 pF, con dieléctrico de aire. Cuando se consiga la ROE mínima, se sustituirá dicho condensador por los discos, hechos de aluminio fino y separados unos 12 mm, que se ajustarán hasta conseguir la misma ROE.

Antena de bucle apilada

También polarizada horizontalmente y de tipo omnidireccional, resulta bastante más eficaz que la de halo, y más apropiada para trabajo fijo. La distancia entre cada bucle deberá ser de una longitud de onda, con lo que cada sección contiene dos trozos radiantes en media onda. Un bucle sólo tiene un gráfico de campo por el estilo del de un dipolo, pero al utilizar dos apilados en ángulo entre sí y en fase de 90° mediante una línea de conexión de λ/4 se obtiene un gráfico casi perfectamente omnidireccional, tal como el que se indica en la fig. 2.18, que es de un modelo de 650 MHz.

Los dos bucles son de tamaño idéntico y la media longitud de onda puede tomarse como una distancia de unos 990 mm. La disposición es la representada en la fig. 2.19. El punto de alimentación debe hacerse con un adaptador transformador simétrico-asimétrico de razón 4:1 si se usa cable coaxil de 50 Ω como alimentador principal. Es esencial una alimentación equilibrada. La ganancia de esta antena debe ser del orden de 3 dB con relación al dipolo simple.

Colineal omnidireccional de elemento plegado

Una antena colineal clásica de dos elementos en fase y poco separados tiene una ganancia aproximada de 1,8 dB. Pueden conseguirse ganancias mayores con pares colineales únicamente separando más los elementos, pero esto implica un sistema de alimentación bastante más complicado, si se quiere mantener la fase

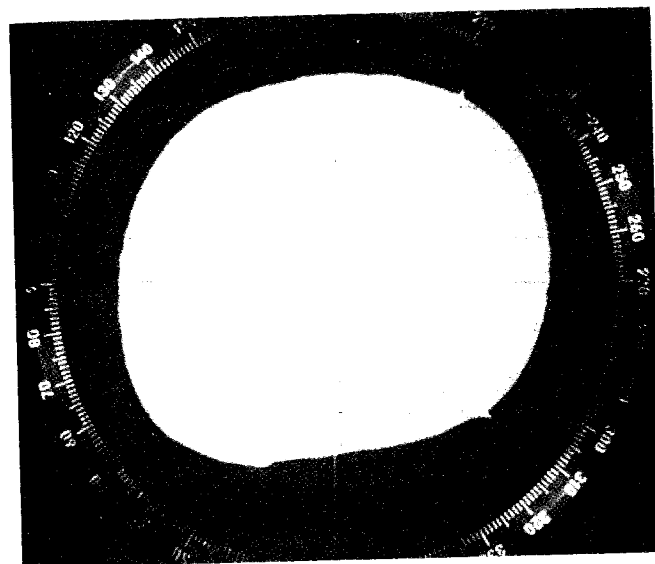
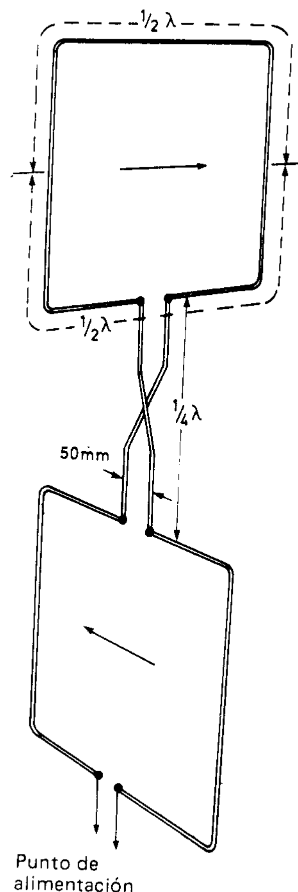


Fig. 2.18.– Gráfico de radiación omnidireccional de un modelo de 650 MHz de la antena de cuadro apilada de polarización horizontal de la fig. 2.19.

adecuada. La mayor ganancia que se puede conseguir con este método es de unos 3 dB con los elementos separados 0,4 λ.

La antena que vamos a describir fue construida por el autor para una estación repetidora de 70 cm y emplea dos elementos de media onda poco separados, pero cada uno de ellos es un dipolo plegado y la ganancia resultante es un poco mayor de los 3 dB. La puesta en fase se consigue del modo usual, con un adaptador de cuarto de onda, aunque en el dibujo se indica uno de 0,625 λ de longitud, destinado a obviar en alguna medida el problema de la distorsión del gráfico de campo – que por lo demás sería omnidireccional – cuando la antena trabaja con polarización vertical y va unida a un mástil metálico.

Fig. 2.19.– Diseño de un par de cuadros de una longitud de onda, apilados y en fase. La radiación es omnidireccional y con polarización horizontal.



Una distancia de montaje de 0,625 λ del mástil metálico se ha encontrado que es la óptima para conseguir mantener al mínimo la reflexión de aquél, que de lo contrario reduciría la radiación en la dirección detrás del mástil. De todos modos, ha de tenerse en cuenta que *esta distancia crítica de montaje no garantiza la ausencia del problema mencionado, y si se necesita un campo completamente omnidireccional se recomienda usar un mástil de material aislante (madera o tubo de PVC), que sobresalga 30 mm o así por encima y por debajo de la antena.* El ángulo vertical de radiación máxima es paralelo a tierra, es decir, a 0° y la anchura del lóbulo de –3 dB (punto de potencia mitad) se encuentra en la zona de los 60°. La antena tiene una amplia anchura de banda y debe mantener una ROE aproximada de 1,1 ó 1,2 a 1 tanto en la banda de 70 cm como en la de 2 m. Para trabajar en 70 cm debe usarse cable coaxil de 50 Ω de bajas pérdidas y con separación semi-aire, pero a menos que el trayecto de éste sea muy largo se podrá utilizar el de un grado menor por el estilo del UR43 en la banda de 2 m. De modo ideal, cuanto menores sean las pérdidas del cable utilizado, mejor, sea cual sea la antena. Recuerden que una pérdida de X dB en el cable significa asimismo X dB menos en la radiación.

Los elementos y el adaptador pueden construirse con varilla de aluminio de 6 mm, que resulta fácil de taladrar para poner tornillos M3 (4BA) en los extremos de los elementos, con el fin de acomodar las piezas de puenteo.

El formato se indica en la fig. 2.20 y las dimensiones de los elementos y adaptador de fase son las siguientes:

	Secciones	*70 cm*	*2 metros*
(a)	Elementos media onda	324 ± 3 mm	960 ± 6 mm
(b)	Long. adaptador	390 ± 3 mm	1168 ± 6 mm
(c)	Separación elementos y adaptador (entre centros)	19 ± 3 mm	25 ± 3 mm

Las dimensiones anteriores ya tienen en cuenta los factores de velocidad y capacitativo.

Observen el bloque aislante entre los extremos de los elementos plegados donde se juntan frente al punto de alimentación. El material tiene que ser de buena calidad, por el estilo de PTFE o equivalente.

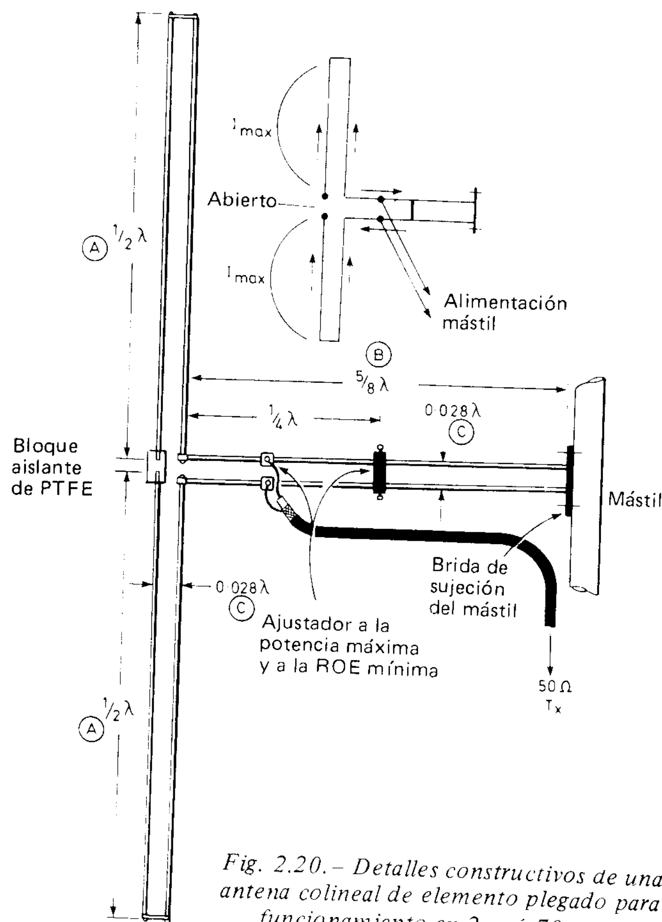


Fig. 2.20.– Detalles constructivos de una antena colineal de elemento plegado para funcionamiento en 2 m ó 70 cm.

La brida de sujeción al mástil, al final del adaptador, ha de ser de 12 mm de ancha por 1,5 mm ó 3 mm, de aluminio; de una longitud de unos 150 mm y agujereada a los dos lados de la terminación del adaptador, para la colocación de pernos de sujeción de 6 mm de diámetro. La barra de cortocircuito del punto de cuarto de onda puede hacerse de aluminio, cuadrada, de unos 9 mm y perforada para admitir las líneas del adaptador, así como perforada y con tornillos M3 (4BA) en los extremos para su sujeción a las líneas una vez terminado el ajuste.

Con la antena ya montada, se procederá a su instalación de modo que quede bien colocada, con alrededores libres, a unos 2 m sobre el suelo y con todo el cable que se vaya a usar ya incluido. Ajusten los puntos de derivación y la barra de corto de cuarto de onda a la potencia máxima y la mínima ROE. Lógicamente, el punto de alimentación necesitará protección contra la lluvia y con ese fin podrá usarse una cajita de plástico oblonga, en la que quedarán encerradas las conexiones de alimentación y el final del cable. Es importante tener un buen cierre, para impedir que pueda penetrar el agua por ese punto. Si entra agua en el cable coaxil, lo arruinará para siempre.

Todas las antenas de VHF funcionan de un modo muy eficaz si están bien altas, por encima de tejados y otros obstáculos conductores, tales como árboles. Esto es aplicable en especial a las antenas por el estilo de las colineales verticales de baja radiación (ángulo cero). Los árboles de gran tamaño y con hojas que se encuentren en el trayecto de la ración pueden atenuar las ondas de radio de VHF y UHF hasta en 20 dB, incluso con tiempo seco.

Trozo coaxil alimentado verticalmente (varilla)

Esta antena es en realidad una Slim Jim modificada, pero en principio se proyectó para su empleo en la marina y por eso va completamente encerrada en una funda, que la protege contra los elementos atmosféricos y el agua salada. Resultaría una antena poco notable para estaciones fijas o móviles (con mástil de varilla y montaje) o para una estación repetidora de 2 m. Aunque muy eficaz, es más difícil de construir que la Slim Jim original como consecuencia del alimentador coaxil de tubo de cobre, de $\lambda/4$ de longitud, y los separadores tan juntos.

La parte radiante es un dipolo plegado, alimentado en su extremo desde la varilla coaxil, que en sí está conectada directamente a un cable de alimentación de 50 Ω. La disposición general es la indicada en la fig. 2.21 y 2.22, donde se incluyen las dimensiones

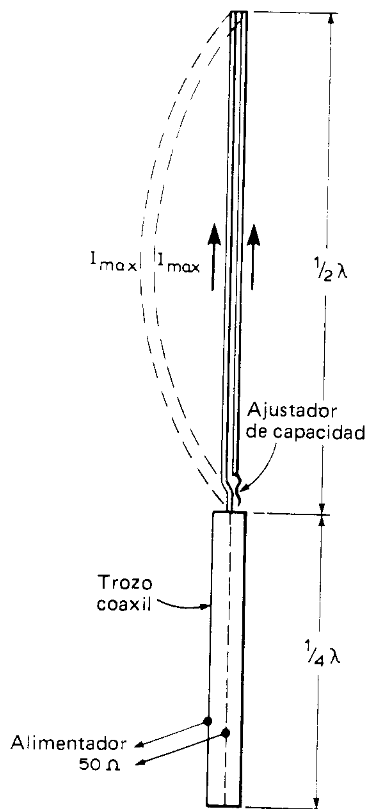


Fig. 2.21.– Disposición para la alimentación en un extremo de un elemento plegado de cuarto de onda, con adaptador coaxil de cuarto de onda.

y detalles de la varilla de λ/4 y los elementos radiantes. La varilla consta de 25 cm de tubo de cobre cerrado por uno de sus extremos con un disco (de cobre o latón) soldado, que forma el cortocircuito y la conexión para el conductor interior. Se necesitan por lo menos cuatro o cinco separadores circulares de perspex de unos 3 mm de grueso para mantener el conductor central recto en toda la varilla, pero el de la parte superior ha de tener por lo menos 6 mm, como se indica.

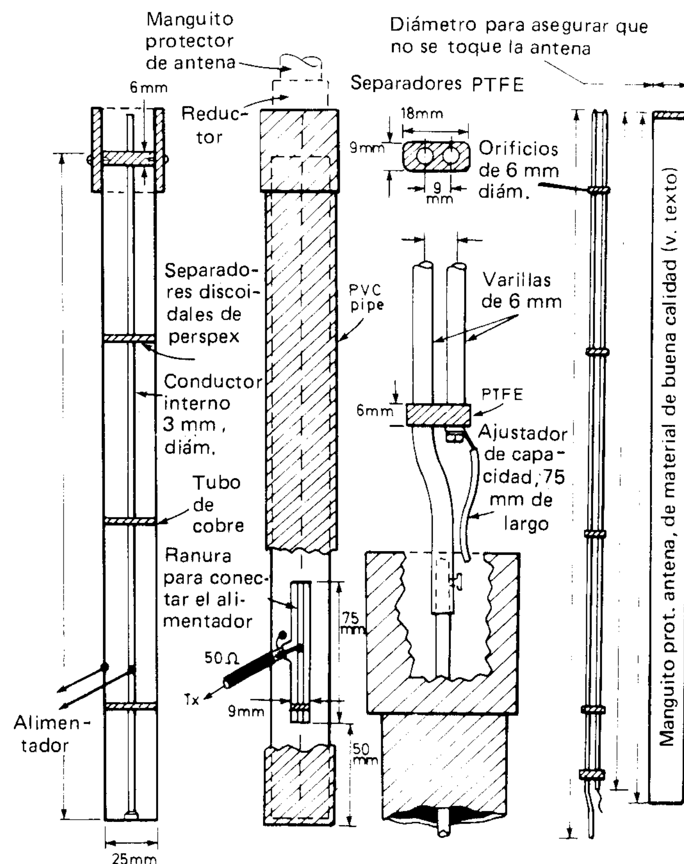


Fig. 2.22.– Detalles constructivos de una antena de media onda completamente protegida y alimentada coaxilmente, como la de la fig. 2.21.

Habrá que cortar una ranura de unos 9 mm de ancha y 75 mm de larga, que empiece a unos 50 mm desde el fondo del tubo, con

el fin de permitir el acceso del cable de alimentación y el ajuste del punto de derivación que asegure el mínimo ROE.

Los elementos radiantes se hacen con varillas de aluminio de 6 mm de diámetro, conectados por su extremo superior con un puente metálico y mantenidos separados por trozos de PTFE (por lo menos cinco), todo a lo largo, tal como se indica. El ajuste final para el funcionamiento se hace determinando primero el lugar del punto de alimentación al conductor interior del coaxil con el fin de obtener la ROE más baja posible. Puede realizarse un reajuste ulterior con una prolongación capacitativa, que se doblará o alterará de longitud hasta que la ROE llegue a 1,1 ó 1,2 a 1 aproximadamente. Téngase en cuenta que esta prolongación capacitativa, que puede ser de hilo del 18 ó 16 swg (1,22 ó 1,63 mm de diámetro), deberá tener una funda aislante para evitar el contacto con cualquier otra parte de la antena. La funda será preferiblemente de PTFE. La radiación de esta antena, como es lógico, es omnidireccional y, en un plano, prácticamente paralela al suelo.

(El PTFE o ,politetrafluoretileno es un material aislante de bajas pérdidas, muy apropiado para su empleo en VHF y UHF.)

Capítulo 3

ANTENAS DIRECCIONALES

En el capítulo anterior hemos tratado de las antenas de polarización vertical y omnidireccionales, muy apropiadas para conseguir una cobertura general y para el trabajo móvil, así como para repetidores, la mayoría de los cuales utilizan antenas de polarización vertical. Excepto los conjuntos colineales, estas antenas tienen muy poca ganancia –cuando la tienen– respecto al dipolo, por lo que cuando se trata de conseguir una mayor potencia eficaz radiada (ERP) hay que recurrir a las antenas direccionales.

De todos modos, conviene que recuerden que hay antenas direccionales (y el dipolo, usado en posición horizontal, es una de ellas) que no proporcionan incremento alguno de la potencia radiada en una o más direcciones. Tales antenas carecen de *ganancia directiva*, en comparación con un radiador isotrópico, al menos. Por eso a veces la ganancia de potencia radiada por una antena suele llamarse ganancia de directividad. Claro está que hay muchas antenas entre las que elegir, de las cuales sin duda la más popular es la Yagi, aunque es grande la controversia acerca de la longitud total y separaciones de los directores respecto a la ganancia obtenible. Se encontrará más información en la bibliografía. De todos modos, para conseguir una gran ganancia con una Yagi hay que recurrir, bien a una antena de longitud considerable, bien a un sistema de dos o más de ellas, lo que no resulta muy practicable en los lugares que disponen de espacio limitado, e incluso algunas pueden llegar a estar prohibidas por los reglamentos locales

Conjuntos de radiación longitudinal

No es difícil conseguir antenas de haz bastante pequeñas, pero eficaces a pesar de todo, para 2 metros (o la banda de UHF de 70 cm) y se pueden alcanzar ganancias de directividad de 10 dB sin tener que usar largos conjuntos como la Yagi o similares, con una gran cantidad de elementos. El reflector de ángulo puede ser una excepción, pero aunque son posibles ganancias de 12 dB, resulta a veces de dimensiones algo grandes.

Partiendo de las llamadas antenas de radiación longitudinal pueden conseguirse otras pequeñas y de buena ganancia, para funcionamiento en polarización vertical u horizontal, y lo mismo podemos afirmar tomando como punto de partida una disposición similar llamada antena de radiación transversal, aunque esta última tiene menos aplicación práctica por cuanto se refiere al funcionamiento en 2 metros. Tales antenas constan básicamente en dos radiadores separados verticales (u horizontales), cada uno de los cuales está en fase con la alimentación y con la separación ajustada de acuerdo con la directividad buscada.

El perfeccionamiento de este método se debe en gran parte al Dr. G. H. Brown (EE.UU.), que también fue el inventor de la antena de plano de tierra, más o menos tal como la conocemos hoy en día. En 1937, G. H. Brown publicó su serie —ahora clásica— de gráficos de radiación (fig. 3.1) que presentan algunas de las combinaciones posibles de directividad con conjuntos de radiación longitudinal y transversal. En el caso del primero, la radiación está por lo general en línea con los dos radiadores, en tanto que en el del segundo está en ángulo recto con la línea del conjunto. Por ejemplo, la radiación de una configuración típica de antena longitudinal compuesta por dos verticales, separadas λ/8 y en oposición (180°), es la que se indica en la fig. 3.1 marcada *x*. El gráfico típico de un conjunto transversal es el mercado *y*, donde la separación es de λ/2 y los elementos están excitados en fase. La separación mayor es poco usada para la radio de aficionados, pero, ello no obstante, ofrece posibilidades de diseño para antenas pequeñas de gran ganancia.

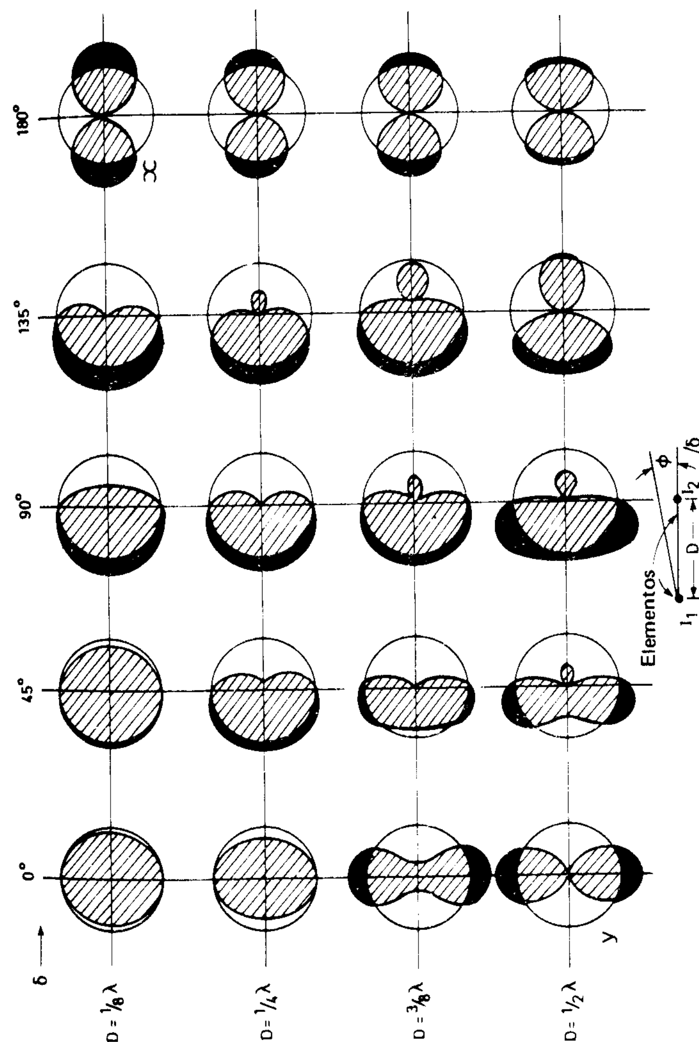


Fig. 3.1. Gráficos de radiación de dos elementos verticales en función del desfase y la distancia que los separa. Los círculos indican la intensidad de campo de un elemento simple de referencia de la misma longitud y con la misma potencia de entrada

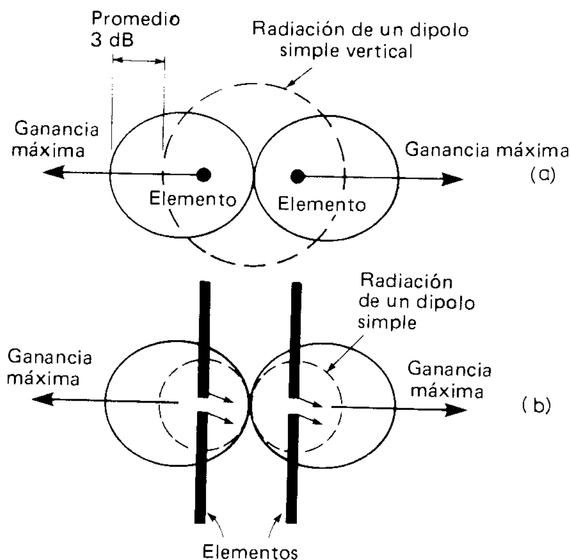


Fig. 3.2.– Gráficos típicos de campo de dos elementos de media onda, alimentados en su centro y separados un octavo de onda, con excitación desfasada 180°.

Una configuración típica basada en esta idea es la que se da en la fig. 3.2, en la que dos radiadores de media onda con alimentación central están separadas $D = \lambda/8$ y excitados en oposición. Esta disposición puede emplerarse verticalmente, tal como se indica, u horizontalmente, de acuerdo con la polarización que se necesite. En el primer caso (mirando desde los extremos de los radiadores) el gráfico del campo será como en *(a)* y el ángulo vertical de radiación, o sea, en un plano paralelo a tierra, será como en *(b)*. Por eso se observará que con esta disposición el gráfico de radiación sería aproximadamente el mismo con las antenas operando vertical u horizontalmente. De todos modos, no siempre es deseable la radiación en dos direcciones, a pesar de la ganancia conseguida respecto al dipolo. Manteniendo igual la separación entre elementos, es decir $\lambda/8$, y alimentando uno de ellos con un desfa-

se de 135° respecto al otro, se puede producir una antena unidireccional de buena ganancia, que se puede usar horizontalmente y tiene un gráfico anterior como se indica en la fig. 3.3 *(a)*, o verticalmente, también con gráfico anterior, aunque en este caso cardioide, tal como se ve en la fig. 3.3 *(b)*. La ganancia anterior es de unos 3,9 dB en los dos modos.

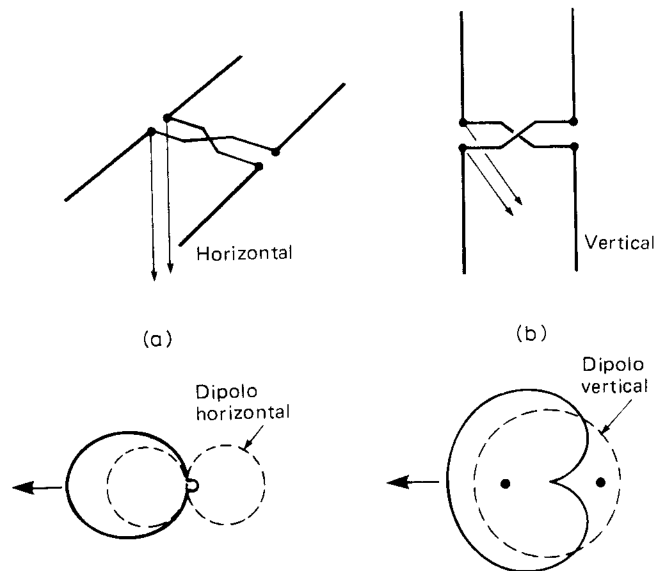


Fig. 3.3.– Configuración y gráficos de campo de una antena de dos elementos separados un octavo de onda y con alimentación desfasada 135°.

Una antena conocida como HB9CV se basa en esta disposición y emplea un sistema de adaptación en gamma para permitir una alimentación directa con cable coaxil de 50 ó de 70 ohmios. La ganancia reivindicada es de unos 5 dB, a la vez que la antena es compacta, aunque muchos de los que la han construido han informado de sus dificultades a la hora de conseguir una ROE baja. Los detalles de una antena de este diseño se dan en la fig. 3.4.

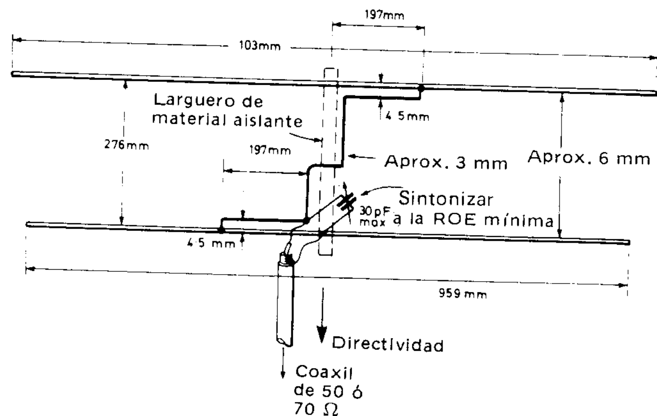


Fig. 3.4.– Detalles de la antena de haz compacta HB9CV, con adaptación en gamma.

La serie especial ZL

Un sistema, basado asimismo en el conjunto de radiación longitudinal, con desfase de 135° en la alimentación de un elemento, fue desarrollado ya por el autor hace unos 26 años para las bandas de a.f. y recibió el nombre de ZL especial. Como los elementos frontal y posterior son de distinta longitud, esta antena presenta asimismo una acción reflector-director, con una ganancia resultante de unos 6 dB sobre un dipolo. Puede alimentarse directamente con cable coaxil de 50 ó 70 ohmios y si está bien ajustada puede conseguir una ROE mucho menor de 1,5 a 1.

ZL especial para 2 metros

Es una antena que no resulta de construcción difícil, y los elementos y la línea de puesta en fase pueden ser de hilo de cobre o de hierro galvanizado o recubierto, o de tubo de cobre o de aluminio, e incluso de cable de bajada paralelo de 300 Ω.

Se han construido y probado más que de sobra una gran cantidad de versiones para 2 metros, y por ser una antena muy compacta también ha demostrado su utilidad en interiores. Tiene características de banda ancha y si está bien construida y sintonizada proporcionará una ROE de menos de 1,5 a 1 en toda la banda de 2 metros. Los detalles constructivos y de otro tipo se dan en las figs. 3.5 a 3.7, y siempre que se respeten las separaciones de

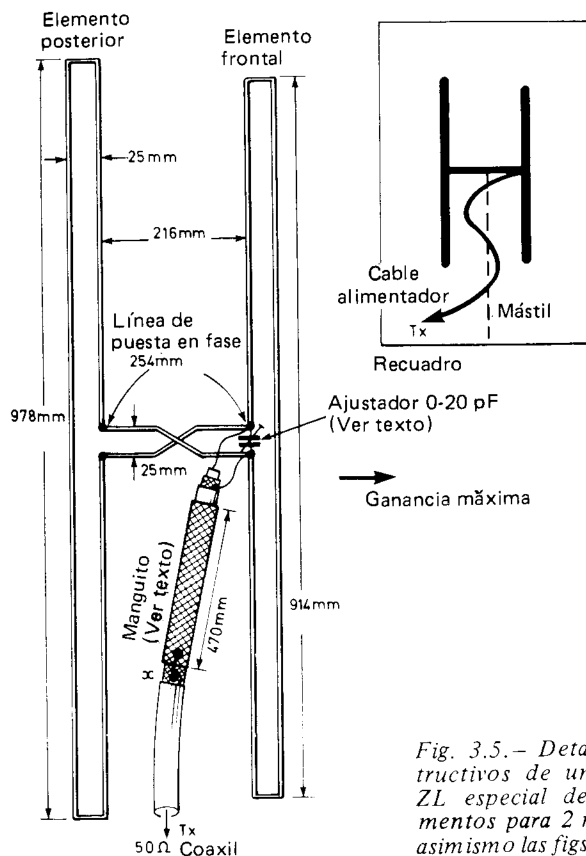


Fig. 3.5.– Detalles constructivos de una antena ZL especial de dos elementos para 2 m. Véanse asimismo las figs. 3.6 a 3.8.

los elementos y la longitud de la línea de enfase, los materiales pueden ser los ya mencionados antes. El condensador de aire, de pequeño tamaño y variable (capacidad máxima de 20 pF) hace falta para conseguir una buena adaptación con el cable coaxil de 50 ó 70 Ω.

Este condensador se ajusta para la ROE mínima con toda la longitud del cable coaxil ya aplicada a la antena. Si ésta ha de funcionar instalada verticalmente, conviene que el cable de alimentación se curve un poco, separándolo de ella para llevarlo hacia abajo. tal como se indica en la fig. 3.5 (detalle en recuadro). El mástil de sujeción de la antena deberá ser de material no conductor (poste de madera o tubo de plástico, etc.) y se prolongará por lo menos unos decímetros por debajo de los extremos finales de los elementos. Los gráficos de radiación, tanto vertical como horizontal, se dan en la fig. 3.6. Observen el manguito de alimentación y adaptación simétrico-asimétrico que hay en el extremo del cable coaxil. donde se une con el punto de alimentación. Este manguito tiene una longitud de 470 mm y está unido a la malla de blindaje del cable principal sólo en el lugar marcado X. El extremo que queda más cerca del punto de alimentación no va conectado a ninguna parte ni debe estar en contacto con las conexiones del punto de alimentación. Para su empleo en exteriores, las conexiones del punto de alimentación, el condensadorcito y el extremo del cable coaxil deberán estar protegidos contra la lluvia. Con este fin servirá una cajita de plástico con una tapa que encaje bien, tal como se esquematiza en la fig. 3.7.

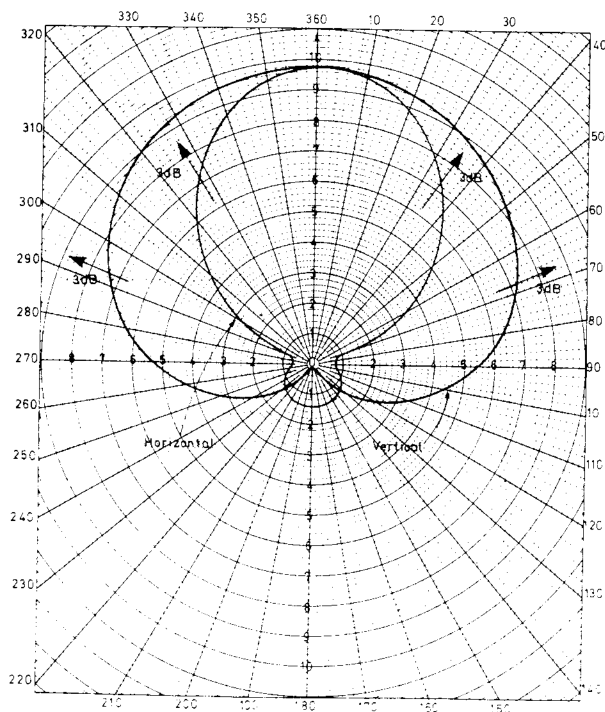


Fig. 3.6.– Gráfico de radiación de la ZL especial con polarización vertical y con la horizontal.

Una versión completamente a prueba de intemperie de este modelo ZL especial usado por el autor en un pequeño barco (G2BCX/MM) y con una altura de sólo 3 m sobre el nivel del agua ha demostrado una eficacia extraordinaria, con numerosos enlaces a larga distancia (DX). Los elementos de esta versión están completamente encerrados en tubo de plástico de sección plana (cable eléctrico). como se aprecia en la foto de la fig. 3.8. Como la antena cabe en el maletero de un coche, resulta ideal para funcionamiento portátil, con un mástil de sección apropiada.

Conjunto simple de radiación longitudinal vertical

Es ésta una antena polarizada verticalmente, que resulta de construcción relativamente fácil y proporcionará una ganancia aproximada de 4 dB en dos direcciones. Sólo hay que hacerle girar 90° para cubrir todo el horizonte y gracias a su compacidad será muy útil para los que viven en pisos en los que les sea difícil instalar una antena exterior. Consta de dos radiadores verticales de media onda alimentados en su extremo con un desfase de 180° para producir un gráfico de radiación por el estilo del de

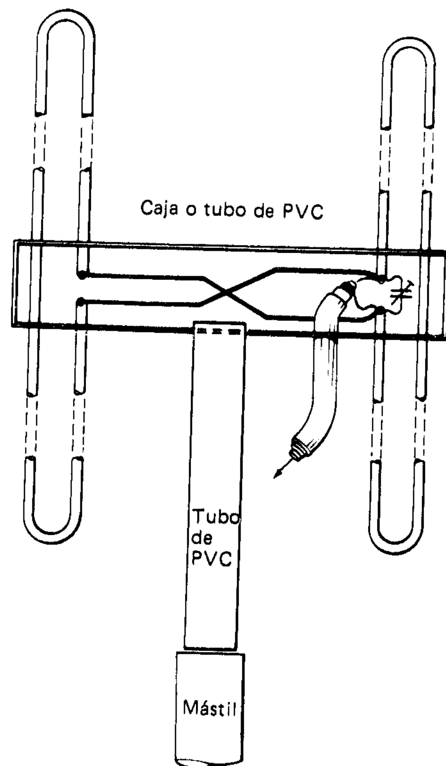


Fig. 3.7.– Alojamiento de la línea de puesta en fase y conexiones de alimentación, etc. de la ZL especial.

la fig. 3.9. Puede montarse en un marco ligero de madera, con los elementos hechos de alambre con revestimiento de plástico del que se usa en las perchas o, mejor aún, hilo de cobre de 2,03 ó 1,63 mm de diámetro. Después se coloca de modo que pueda girar en un soporte de suelo, tal como se indica en la figura, lo que la hace apropiada para su empleo en interiores.

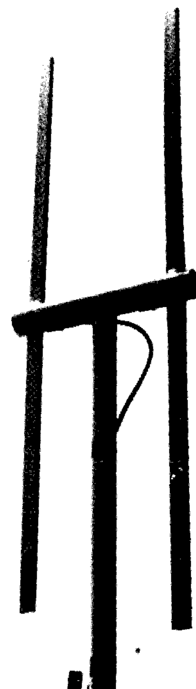


Fig. 3.8.– Una ZL especial alojada en tubo de plástico para su protección contra los agentes atmosféricos (G2 BCX/MM).

El ajuste a la ROE mínima se consigue deslizando la barra de cortocircuito, a la vez que se desplazan los puntos de alimentación del cable de 50 Ω. Las posiciones aproximadas de éstos se dan en el dibujo, pero lo más seguro es que se necesite algo de reajuste para obtener una ROE que se aproxime a 1 a 1. El gráfico de radiación se muestra en el recuadro de la fig. 3.9.

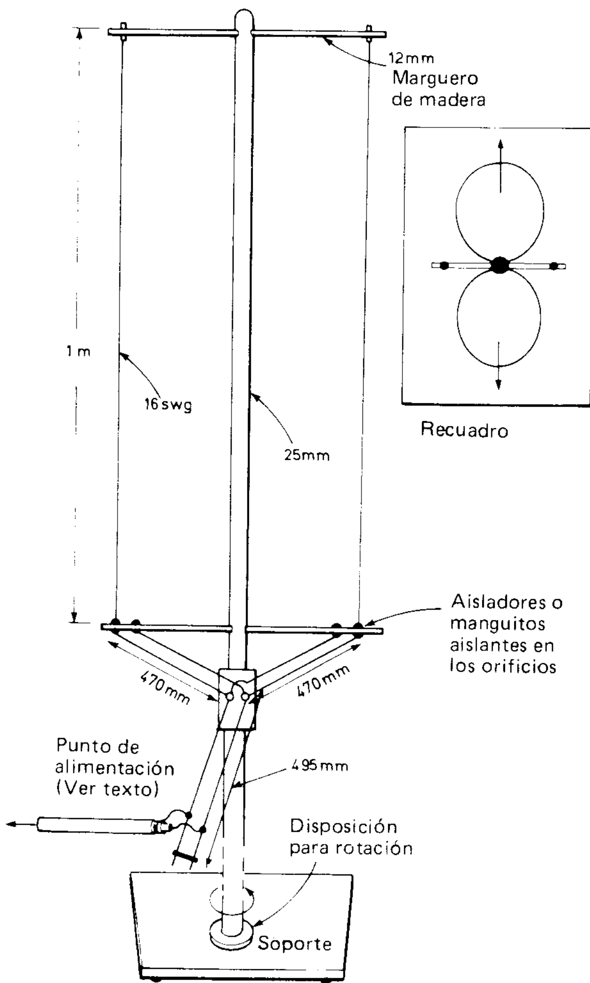


Fig. 3.9.– Detalles constructivos de una antena simple bidireccional para su empleo en interiores, dispuesta para girar en 180°.

Conjuntos ZL especiales de varios elementos

Como la ZL especial básica es un conjunto excitado y su gráfico de radiación es unidireccional, se ha podido agregarle elementos parásitos para incrementar su ganancia frontal. No se necesita reflector, porque éste ya va integrado en la propia ZL especial, por lo que sólo se usan directores. Uno de éstos montado a 0,12 λ delante del elemento excitado incrementará la ganancia frontal en 1,5 dB aproximadamente, lo que da un total de 7 a 7,5 dB, que resulta francamente bueno para una antena que sólo mide 510 mm de delante atrás.

La adición de tres directores, que convierten la ZL en una antena de cinco elementos, con sólo 1 m de longitud, llevará la ganancia frontal un poco por encima de los 9 dB, lo que ya resulta comparable con una Yagi de ocho elementos, de longitud física aproximada de 2,8 m, o sea, casi el triple de la ZL de cinco elementos.

La construcción de la sección de elementos excitados de una antena ZL de cinco o siete elementos es la misma que en el caso de la básica representada en las figs. 3.5 a 3.7, pero esta sección tiene que estar aislada del soporte que también sujeta los directores y está hecho de tubo cuadrado de aluminio de 18 mm, cuya longitud está determinada por la cantidad de directores que se vaya a usar. Los detalles referentes a las longitudes de los directores y su separación, según se trate de una versión de cinco o de siete elementos, se dan en la fig. 3.10. Los directores se atornillan al larguero (o se sujetan los orificios en él practicados) en sus centros exactos. Las líneas de fase que unen los elementos excitados pueden ser de hilo de cobre de 1,6 ó 2 mm de diámetro, y para asegurarse de que no se toquen se les pondrán manguitos aislantes.

Las ganancias relativas y los gráficos de radiación de la serie de antenas ZL se dan a título comparativo en la fig. 3.11. La ZL especial de dos elementos tiene una ganancia de unos 6 dBd, en tanto que la de cinco elementos llega a 9,5 dBd y la de siete a cerca de 10,5 dBd. Para conseguir estas cifras de ganancia máxima es importante que las antenas estén ajustadas correctamente, se emplee cable coaxil de buena calidad y la ROE no sea superior a un valor de 1,2 a 1.

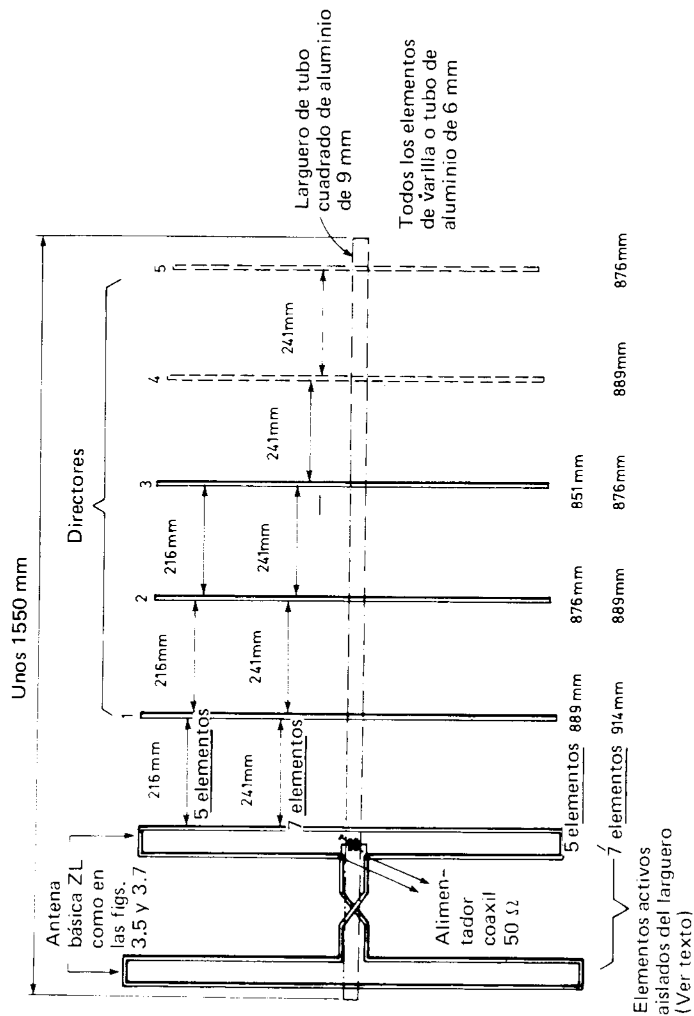


Fig. 3.10. Detalles constructivos de una ZL especial de cinco o siete elementos. Obsérvese la diferencia entre la separación de los elementos y las longitudes de éstos en los casos de cinco y de siete de ellos. Véanse asimismo las figs. 3.5 y 3.7 para lo referente a la construcción de los elementos activos.

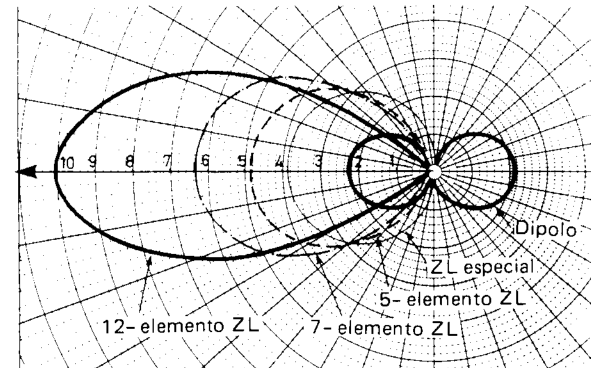


Fig. 3.11.– Gráficos de radiación de la serie de antenas ZL descritas en este capítulo.

Conjunto ZL de 12 elementos

Esta antena es el resultado de perfeccionamientos prolongados y si se construye con cuidado puede dar una ganancia por lo menos de 13,5 dBd, con una ROE en toda la banda no superior a 1,5 a 1 aproximadamente. También es muy importante, para conseguir estas cifras, el empleo de cable coaxil de buena calidad y bajas pérdidas. Aunque con un cable de calidad inferior también se pueda obtener una ROE baja, las pérdidas que en él se producirán habrán de traducirse inexorablemente en un mal rendimiento de la antena.

En la fig. 3.12 se da la construcción de una versión de 12 elementos, junto con los detalles referentes a la longitud del larguero, así como la de los directores y su separación.

De todos modos, hay una diferencia en el sistema de alimentación y línea de fase, lo mismo que en la construcción de los elementos. Todo esto quedará aclarado con las figs. 3.13 y 3.14. Los elementos excitados están girados, de modo que forman ángulo recto con la antena y no como están en las otras antenas ZL ya descritas. La línea de fase está hecha con cable paralelo de 300 Ω

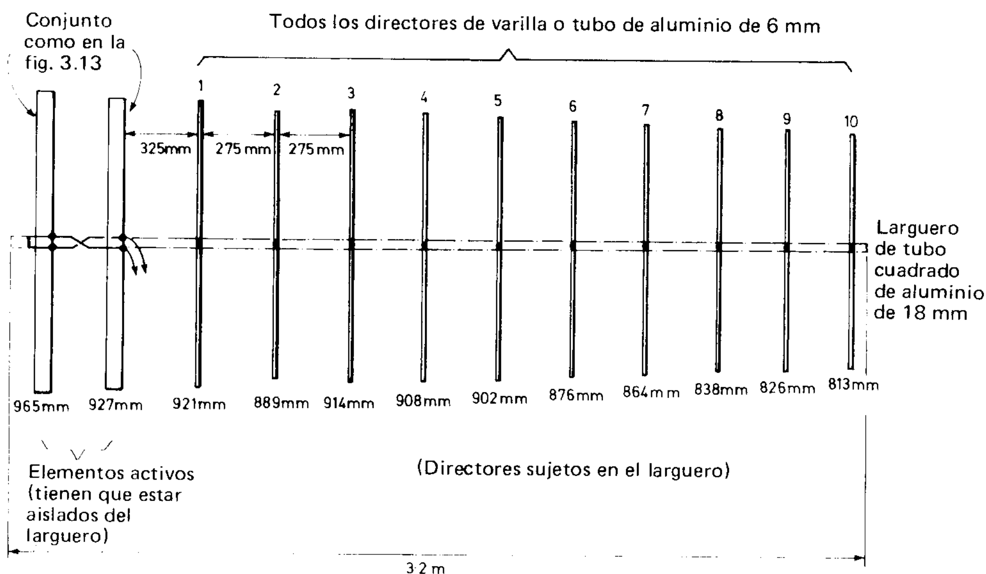


Fig. 3.12. - Detalles de una antena ZL de 12 elementos con una ganancia aproximada de 13,5 dB respecto a un dipolo (véanse también las figs. 3.13 y 3.14).

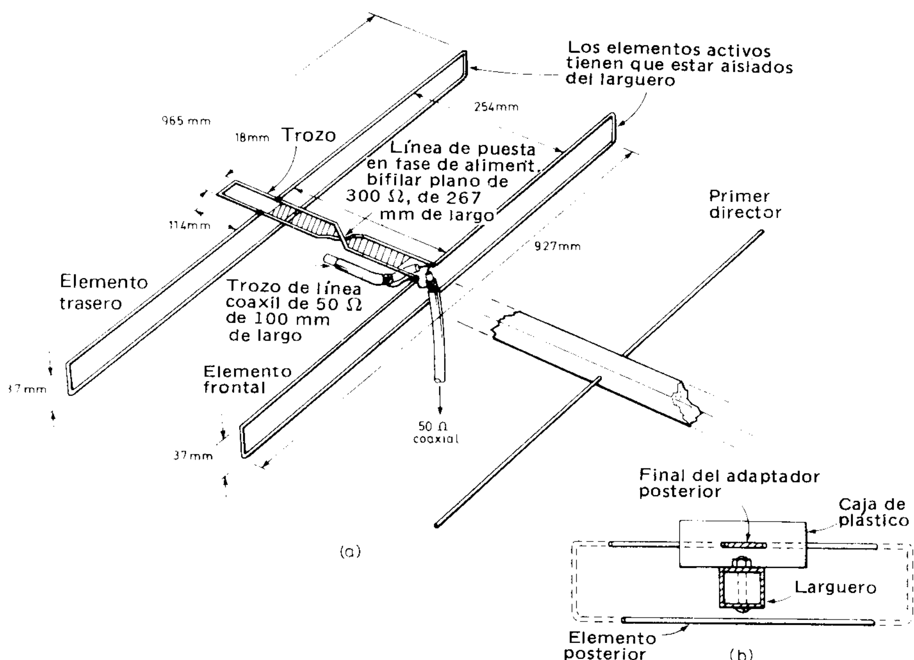


Fig. 3.13. - Disposición de los elementos activos, línea de puesta en fase y adaptadores de sintonía de la antena ZL de 12 elementos.

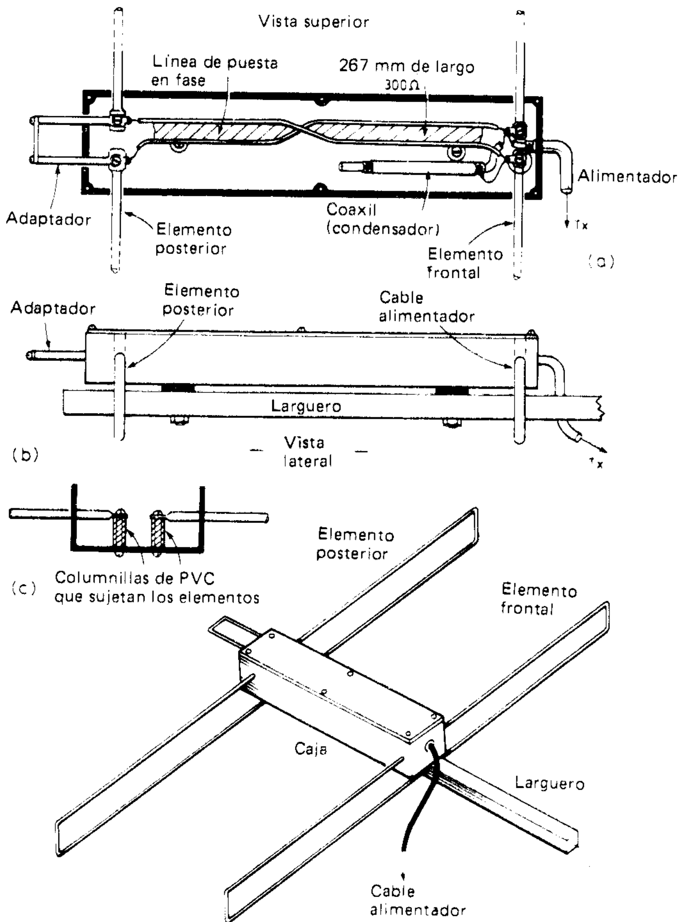


Fig. 3.14.– Método para la protección de la línea de puesta en fase y conexiones del cable, así como para aislar los elementos activos respecto al larguero.

(267 mm de largo) y obsérvese el adaptador pequeño que atraviesa el punto de alimentación del elemento posterior y la línea de fase.

También atravesando el punto de alimentación del elemento frontal hay un trozo de 114 mm de cable coaxil de 50 Ω (abierto en un extremo), que actúa como capacidad de sintonía de bajo valor. Para conseguir la ROE mínima en toda la banda, la longitud de este trozo de coaxil puede exigir algún ajuste, que deberá hacerse en 145 MHz. En la fig. 3.13 *(b)* se ilustra cómo se han dispuesto los elementos para que vayan por debajo del larguero, pero sin contacto con él, y cómo se sujetan en la caja aislante. Esta deberá ser lo suficientemente larga para acoger la línea de fase, los puntos de alimentación, etc. y será de plástico o madera dura, con la forma indicada en la fig. 3.14 (*c*).

Si se emplea madera, asegúrense de que esté bien seca, y, una vez terminado el montaje y el ajuste, aplíquenle por lo menos tres manos de barniz resistente al agua. Utilicen algún tipo de masilla de hermeticidad para asegurarse de que el agua no podrá penetrar en su interior por la unión con la tapa.

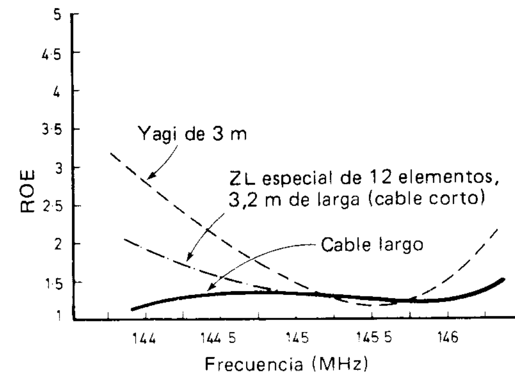


Fig. 3.15.– Gráfico de ROE en función de la frecuencia correspondiente a la ZL de 12 elementos, de 3,2 m de longitud, y una yagi de 3 m,

El gráfico de radiación de la versión de 12 elementos se da en la fig. 3.11. Las curvas de la fig. 3.15 representan la ROE obtenible en la banda de 145 MHz (144 a 146 MHz) con una antena ZL especial de 12 elementos. Con un cable largo (más de 16 m) la curva tenderá a achatarse hacia las frecuencias más bajas. La curva obtenida con el cable normal indica un gran ancho de banda. El gráfico que da la ROE en función de la frecuencia de una Yagi se da a título comparativo y se ve que es más aguda, lo que indica una resonancia más fuerte, pero una potencia reflejada mucho mayor cuando está fuera de esa resonancia.

La fig. 3.16 es una foto de antena de este tipo (ZL de 12 elementos) montada en su rotor. También va equipada con un rotor

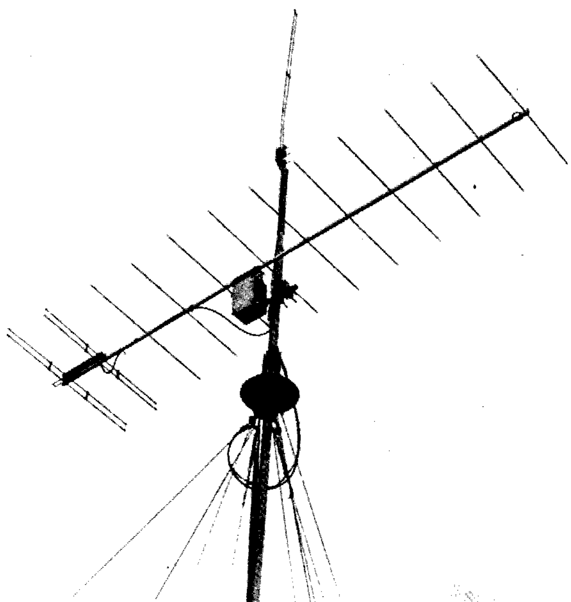


Fig. 3.16.– Antena original del autor, del tipo ZL de 12 elementos, completa con rotor de 360° y girador horizontal-vertical. La antena vertical de la parte superior es una Slim Jim.

de vertical a horizontal, movido eléctricamente, que es la caja pequeña oblonga del centro. La antena instalada encima de ella, en lo alto del mástil, es una Slim Jim.

Rotor de vertical a horizontal

Un rotor pequeño, destinado a orientar la antena para que pase de funcionamiento vertical al horizontal, no resulta difícil de conseguir ni necesita ser de construcción robusta y voluminosa. Todo lo que hace falta en realidad es un motor pequeño reversible (de c.c.) y un tren de engranajes para conseguir la potencia suficiente para hacer girar el brazo que soporta el conjunto 90°. La idea se esboza en la fig. 3.17 *(a)* y *(b)*. El motor es uno pequeño de 12 V y los engranajes están hechos con Meccano. Los microinterruptores están accionados por levas colocadas en el eje principal, para que corten la alimentación del motor al final del recorrido en cada dirección, es decir, en 0 y en 90°. Un circuito que sugerimos para la parada automática y la inversión del motor es el de la fig. 3.18.

Conjuntos parásitos

En el capítulo 1 se explicó, siquiera fuese brevemente, el principio básico de un conjunto parásito, aunque, como sucede en el caso de la serie de antenas ZL, puede ser activo uno o más de sus elementos. Por lo general, un elemento parásito obtiene su energía de otro activo o excitado, mediante acoplo electromagnético, pero, al mismo tiempo, puede volver a radiar esa energía, que puede ser bastante considerable. Como el elemento (o elementos) parásito puede estar muy cerca del (o los) activo y entre sí si son varios, la energía puede transferirse asimismo de un elemento parásito a otro.

El comportamiento de los elementos activos y parásitos de una antena que se encuentran en una proximidad bastante cercana es muy complejo, ya que en él intervienen factores tales como relación de fase e impedancia. Ello no obstante, antes de empezar

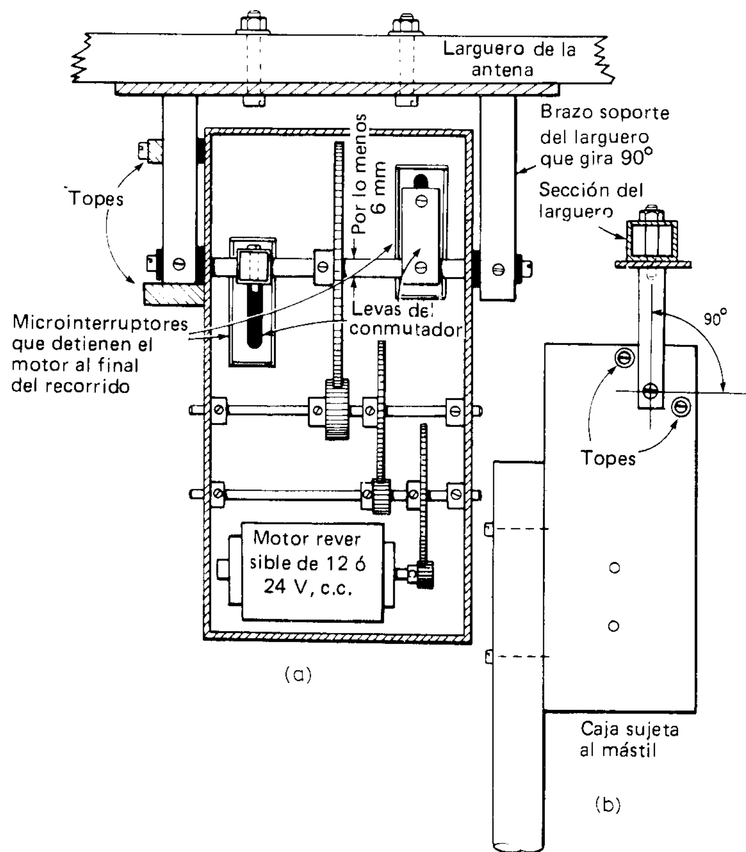


Fig. 3.17.– Idea para la construcción de un rotor para orientar una antena. Las levas se usan para interrumpir la alimentación del motor al final de los recorridos. La caja es una Eddystone de fundición o una cualquiera metálica con tapa, y sus paredes deberán ser lo suficientemente robustas para aguantar los ejes de los cojinetes y los que sujetan la antena.

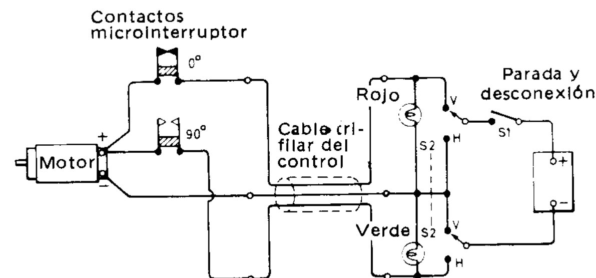


Fig. 3.18.– Circuito para el control del girador horizontal-vertical. Al accionar el motor se cierra el contacto apropiado. En el circuito está cerrado el microinterruptor de cero grados, por lo que cuando la antena alcanza la posición vertical este contacto se abre, interrumpiendo con ello la alimentación del motor. La inversión del conmutador S_2 a horizontal hará que la antena pase a esta posición. El microinterruptor de 90° quedará cerrado entonces, abriéndose al alcanzar la antena la posición horizontal. El interruptor de parada S_1 se puede utilizar para detener la antena en cualquier posición inclinada intermedia entre 0 y 90°

vamos a tomar un par de dipolos situados muy cerca uno del otro. Al aplicar energía a uno de ellos y circular por él una corriente, en el otro se inducirá una tensión, y por tanto pasará por él también una corriente, como consecuencia del campo electromagnético creado alrededor del elemento o dipolo excitado. A su vez, la corriente que circula por el segundo dipolo creará un campo magnético a su alrededor, el cual inducirá una tensión en el primero de los dipolos (el excitado) y la corriente que por él circulará será –teniendo en cuenta la influencia de la fase– la suma de la original y la inducida por el segundo dipolo o parásito. Ahora bien, el proceso mencionado origina una alteración de la impedancia del dipolo activo, debido al acoplamiento mutuo entre ambos, lo que crea una impedancia mutua entre los elementos activo y parásito. La impedancia final real del elemento activo es la suma de la suya propia y la mutua debida al elemento que está junto a él.

Cuando la separación de los dos elementos es bastante grande, llegando a una porción considerable de la longitud de onda, transcurre un determinado período de tiempo hasta que la radiación del elemento excitado llega al siguiente (parásito) y vuelve a él. Como consecuencia se produce un desfase entre la corriente original del primer elemento y la inducida en él por el parásito. Este desfase dependerá de la separación entre ambos y por tanto las corrientes original e inducida pueden estar completamente en fase o en oposición. En el primer caso la corriente combinada es grande y la impedancia del elemento activo, pequeña, mientras que en el segundo, por lo contrario, la corrientes es pequeña y la impedancia, grande.

Imponiendo separaciones intermedias entre estas dos extremas y por tanto desfases también intermedios, la impedancia del elemento excitado podrá hacerse mayor o menor hasta cierto punto.

Otro factor que afecta a la impedancia es la sintonía del elemento parásito. Si éste no es exactamente resonante, la corriente que por él circula tendrá una fase que estará adelantada o retrasada respecto a la que habría si el elemento hubiese sido exactamente resonante. Esto a su vez ocasiona un avance de fase o un retardo, que altera la fase de la corriente reinducida en el elemento excitado. Dicho de otro modo, la magnitud de la corriente del elemento parásito y su fase respecto a la del activo dependen de la sintonía, así como de la separación. El elemento parásito puede tener una longitud fija de $\lambda/2$, realizándose la sintonía con una reactancia ficticia incluida en serie con el elemento en su punto central. También puede recurrirse a hacer que el elemento parásito sea continuo, realizando la sintonía mediante la modificación de la longitud. Este método es más sencillo y práctico, y, como resultado, los *directores* parásitos de los conjuntos Yagi, que es como suelen llamarse, se van haciendo más cortos a medida que crece su distancia al elemento activo.

Por otra parte, la sintonía de un elemento parásito puede ser tal que haga a dicho elemento más largo eléctricamente hablando, añadiéndole resistencia o, de modo más práctico, puede hacerse aquél físicamente mayor para conseguir el mismo resultado, lo que permite utilizar el elemento como *reflector*. Con esta disposición, la puesta en fase de los campos entre el elemento excitador y el reflector es tal que en la parte posterior del reflector no se produce practicamente ninguna radiación, sino que su campo frontal se suma con el de los elementos activos.

El que un elemento parasito funcione como reflector o como director depende sobre todo de las fases relativas de las corrientes que circulan por él y el elemento activo. Con una separación entre elementos de $\lambda/4$ o menos, la corriente del elemento parásito quedará correctamente en fase si se ajusta su sintonía para que quede en el extremo de frecuencia menor de la resonancia (reactancia inductiva). Entonces el elemento parásito actúa como reflector. Si la sintonía es tal que la resonancia está en el extremo de frecuencia superior (reactancia capacitiva), el elemento parásito se comportará como director. La separación entre el elemento activo y su reflector o su director determina en gran parte la ganancia frontal que se puede conseguir.

Conjunto parásito básico de dos elementos

La ganancia teórica máxima que se puede alcanzar con un elemento activo y otro solo parásito suele ser función de la sintonía y la separación. El resultado de un análisis llevado a cabo por G. H. Brown es el que se da en la fig. 3.19, donde las dos curvas representadas corresponden a la ganancia que se puede obtener con diferentes separaciones, cuando el elemento parásito se sintoniza para que funcione como reflector o director. Si se sintoniza un elemento parásito para que actúe como director, la ganancia mayor se alcanza cuando la separación es de 0,1 λ aproximadamente, como en la fig. 3.20. Con él sintonizado como reflector, la separación óptima para una ganancia máxima es de 0,15 λ aproximadamente. Estas cifras dan por supuesto que no hay pérdidas y que los elementos también están sintonizados para la ganancia máxima. En la práctica la ganancia conseguida es algo menor.

Con conjuntos parásitos la resistencia de radiación en el centro del elemento activo varía con la separación y la sintonía de los elementos parásitos, y con una separación del orden de 0,1 λ puede llegar a ser muy baja, de alrededor de 14 Ω. Pero esto tiende a reducir el rendimiento, ya que la energía aplicada a la antena se disipa en calor también en vez de radiarse, como consecuencia de

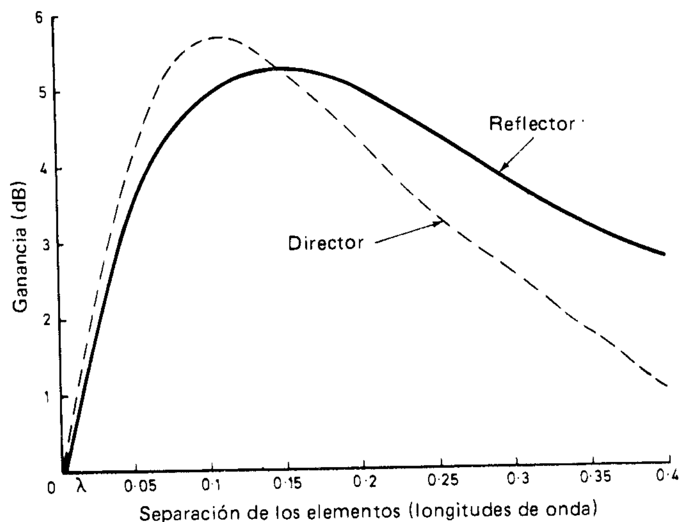


Fig. 3.19.– Curvas que dan la relación entre la separación de los elementos y la ganancia, con un elemento activo y otro parásito.

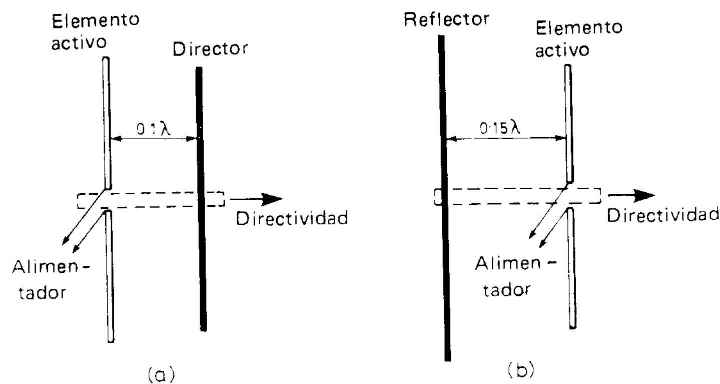


Fig. 3.20.– Disposición de los elementos activo y parásito, utilizado este último como reflector o director.

que la resistencia de radiación es de una magnitud comparable a la óhmica de pérdidas del sistema. La resistencia de pérdida puede reducirse empleando conductores de baja resistencia, lo que exige que sean de un diámetro bastante grande, en tubos de cobre o aluminio, sobre todo si se trata de antenas para su funcionamiento en VHF y UHF. Afortunadamente las antenas para estas frecuencias son de pequeño tamaño y los elementos pueden sujetarse por sí. Todo el material aislante utilizado en su construcción, sobre todo en los puntos en que aparece la tensión máxima, deberá ser de la mejor calidad posible, pues de lo contrario se producirían pérdidas.

Construcción de conjuntos parásitos

La variedad existente de tipos de antenas yagi es demasiado amplia para que intentemos incluir aquí detalles de construcción de todas ellas, aunque el lector interesado podrá hallar en la bibliografía guías más que suficientes que le puedan ayudar a resolver su caso. Las antenas de tipo yagi constan de combinaciones que van desde un elemento básico activo y un reflector pasivo, hasta las que tienen el dipolo, reflector y hasta 20 e incluso más directores. Además, estas antenas pueden apilarse unas sobre otras o colocarse en paneles, adyacentes comerciales que están formados por ocho yagis de 10 elementos, apiladas y adyacentes, con los que se consiguen ganancias que se aproximan a los 25 dB, lo cual significa una ganancia de potencia frontal de más de 300 veces, o una potencia radiada de 300 veces la aplicada a esa antena.

El diseño de las antenas yagi y sus ganancias, ancho de banda y directividad dependen mucho de la longitud total del conjunto, la cantidad de elementos utilizados y sus longitudes y separaciones. Los conjuntos constituidos por un gran número de elementos (en ese número total se incluyen también los activos) suelen llamarse yagis largas, que resultan bastante prácticas en VHF y UHF. Tales conjuntos pueden combinarse con el fin de conseguir polarización vertical y horizontal, lo cual consiste en realidad en duplicar una antena simple, colocando una horizontal y otra vertical. Estas pueden alimentarse de tal modo que produzcan polarización vertical u horizontal, así como inclinada, elíptica o circular. Otro método para pasar de horizontal a vertical es emplear un solo conjunto con un motor que lo oriente en cada caso, ha-

ciéndole girar 90°, como ya se ha dicho antes en este mismo capítulo.

Carece de sentido construir conjuntos parásitos con menos de cinco o seis elementos para trabajar en VHF y UHF, ya que la ganancia de un sistema de 2 elementos apenas vale el esfuerzo, cuando sin más que incluir unos pocos directores más se consigue una ganancia muy superior. Uno de los problemas de los conjuntos yagi, sin embargo, es la obtención de una adaptación razonablemente buena a los cables de 50 Ω o a los de 70 Ω, ya que la impedancia del elemento activo, que suele ser un dipolo, se reduce mucho en presencia del reflector y los directores. Para alimentación con 70 Ω se puede usar un dipolo plegado como elemento activo, ya que su impedancia propia, de unos 300 Ω, se reduce casi a 70 Ω cuando se encuentra cerca de un reflector y un director. Probablemente el método más corriente de adaptar un cable de 50 Ω a un conjunto parásito provisto de un dipolo normal sea el empleo de una adaptación en gamma, por el estilo de la indicada en el conjunto de cuatro elementos de la fig. 3.21.

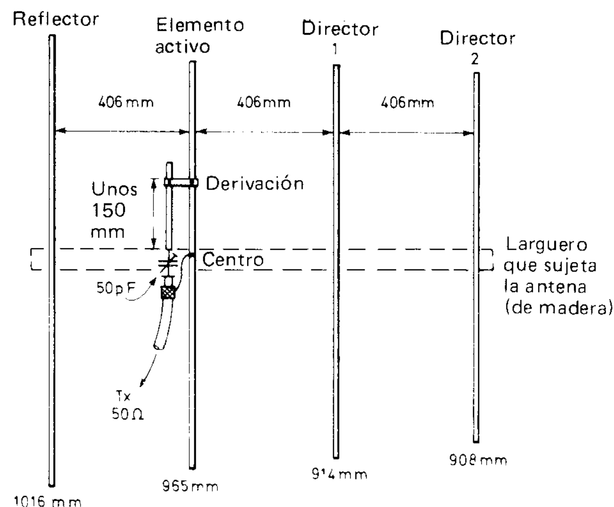


Fig. 3.21.– Medidas para la construcción de una antena yagi de cuatro elementos con adaptación en gamma.

El larguero podría ser de metal, ya que los centros de todos los elementos están a potencial cero de r.f. Los elementos por su parte pueden ser de tubo de aluminio o cobre, de un diámetro de 9 a 12 mm, así como el adaptador gamma del punto de alimentación. El condensador de 50 pF debe ser un tipo pequeño, de aire, y tanto éste como el punto de derivación del adaptador en gamma se ajustarán a la ROE mínima. En este punto de alimentación hará falta algún tipo de protección para él y el condensador, para lo que se utilizará una cajita de plastico bien cerrada, que impida la entrada de humedad. Recuerden que es de la mayor importancia evitar que entre agua en el extremo abierto del cable coaxil, ya que de lo contrario no sólo se perjudicaría el rendimiento de la antena, sino que incluso el propio cable se arruinaría.

Yagi de 7 a 10 elementos

Esta antena, que se representa en la fig. 3.22, emplea un dipolo plegado con adaptación de relación (véase el capítulo 4). El larguero, que habrá de tener 3 m de largo, es de madera seca y dura. Los elementos pueden ir sujetos en agujeros practicados en el larguero, los cuales se protegerán contra la intemperie dándole a éste dos o tres manos de pintura o barniz. Después de su montaje final, a la antena en general se le aplicarán asimismo una o dos capas de barniz. Las conexiones del cable al punto de alimentación también tienen que estar protegidas contra el agua de lluvia, para lo cual se usará una cajita de plástico atornillada al larguero.

Los elementos reflector y directores pueden hacerse de cobre o aluminio, en tubo de 6 a 12 mm de diámetro, con lo que resultan autoportantes. El dipolo plegado se construye tal como se indica en la fig. 3.22 (b) y puede alimentarse directamente con cable coaxil de 50 Ω y un bucle de adaptación. Las dimensiones dadas para los elementos activo y parásitos proporcionarán un rendimiento óptimo en el centro de la banda, es decir, en 145 MHz Pueden usarse más directores adicionales para incrementar la ganancia frontal, como se representa con líneas de trazos en la fig. 3.22 *(c)*.

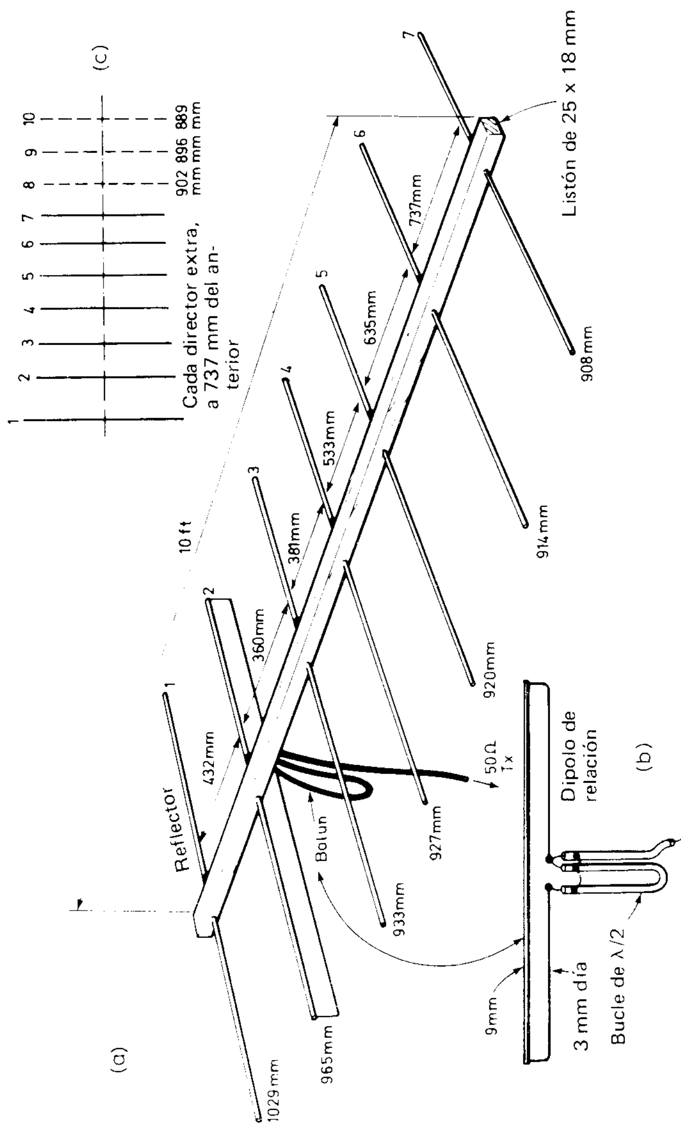


Fig. 3.22. - Detalles para la construcción de una antena yagi de siete o diez elementos con adaptación de relación.

Es importante usar material del diámetro apropiado, uno grueso y otro fino, ya que la relación entre los diámetros es la que determina la impedancia en el punto de alimentación. El transformador de impedancias, de simétrico a asimétrico, que es una sección de λ/2, puede hacerse del mismo cable coaxil utilizado para unir la antena al transmisor y será de unos 686 mm de largo si el factor de velocidad del cable es de 0,66. La ganancia frontal de esta antena deberá ser del orden de 11 dB con siete elementos y de 12 a 13 dB con diez, caso este último en el cual la longitud total de la antena llegará a cerca de 4,6 m. Puede conseguirse una ganancia mayor aún con una ZL de 12 elementos, que sólo tiene 3 m de longitud total.

Antena de ranura de esqueleto

El sistema de ranura "de esqueleto" fue desarrallado por B. Sykes, G2HCG, de J-Beams Limited. Su nombre se deriva de la propia naturaleza del elemento activo primario. Una antena de ranura normal es, como su nombre indica, simplemente una ranura de una longitud aproximada de λ/2, cortada en una placa de conductor de mucho mayor tamaño, que, al ser excitada, radia como un elemento normal de hilo o tubo, excepto en que el plano de polarización está desfasado 90°, es decir, que una ranura vertical queda polarizada horizontalmente, y viceversa. La antena de ranura abierta o de esqueleto se deduce tal como se indica en la fig. 3.23 y en cierto modo podría considerarse como un bucle compuesto de dos radiadores de media onda *(a)* plegados como en (b) y unidos para formar el bucle grande como en *(c)*. Este podría considerarse como una longitud $Z_0 = 276 \log_{10} (D/d)$, siendo D la anchura de la sección cerrada y d el diámetro del conductor utilizado. Para funcionar con un cable de alimentación de baja impedancia (70 Ω) se emplea una adaptación en delta, como se ve en la fig. 3.25 *(b)*, conectada al centro del bucle.

Cada sección del bucle de ranura, es decir, cada sección original de λ/2 radiará ahora en fase en un modo muy aproximado a como lo hace un bucle cuadrado formado por dos radiadores de λ/2. El sistema es de banda bastante ancha, pero tiene también la ventaja de que se puede usar para excitar un sistema apilado de

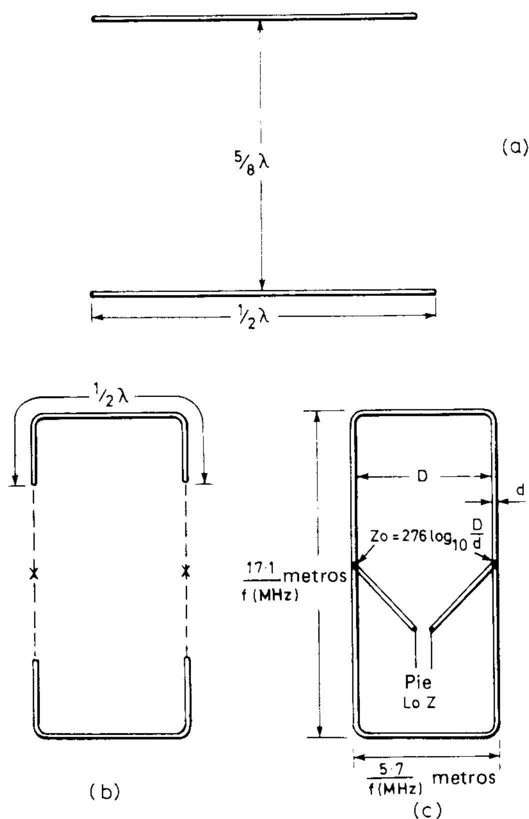


Fig. 3.23.– Formación del radiador de ranura en esqueleto (véase la explicación en el texto).

reflectores y directores. Cada una de las mitades de la ranura funciona como radiador, por lo que la configuración mostrada en la fig. 3.24 debería considerarse como conjunto de "seis sobre seis" y proporcionar una ganancia alrededor de 11 dB, así como una anchura de haz de media potencia de un valor de 50°.

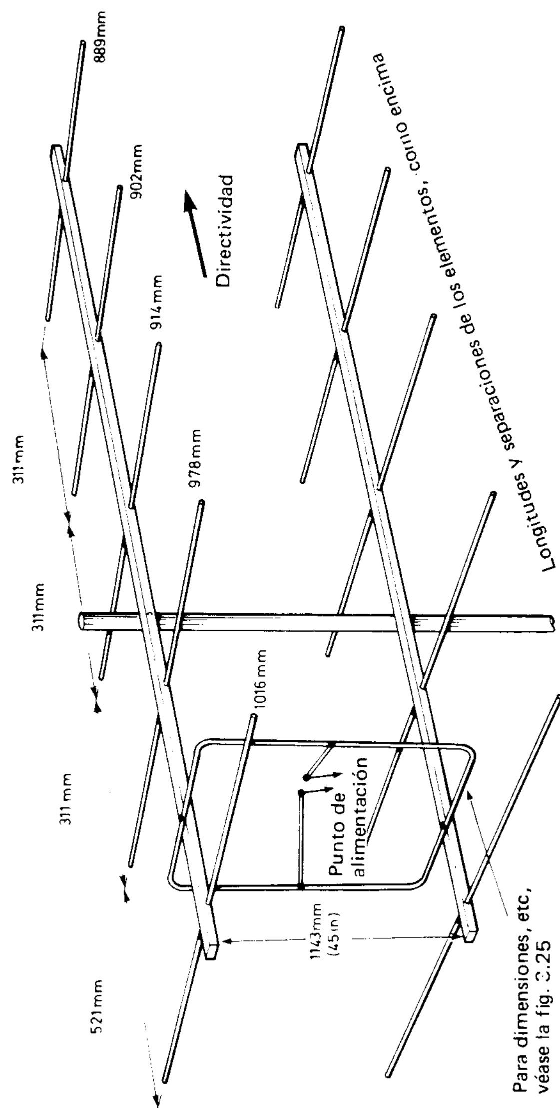


Fig. 3.24.– Detalles de construcción de una antena de ranura, de seis sobre seis elementos.

Los detalles del radiador y la sección de adaptación se dan en la fig. 3.25. Dos conjuntos de esta naturaleza han sido comercializados por J-Beams Limited: uno de ellos es de "cinco sobre cinco", con una ganancia de 10,9 dB, en tanto que el otro es de "ocho sobre ocho" y tiene una ganancia de 12,6 dB.

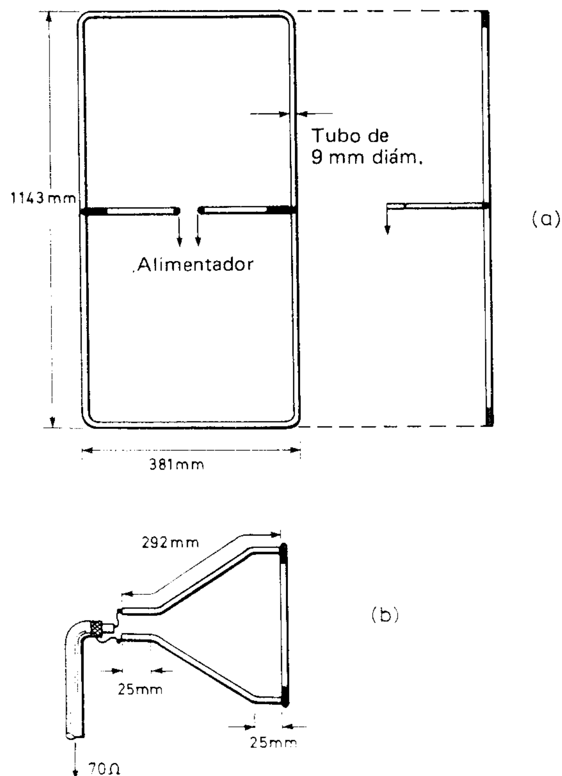


Fig. 3.25.– Disposición de adaptación en delta para la excitación de la antena de la figura anterior.

Antena de cuadrete

Este tipo de antena puede deducirse perfectamente de un dipolo plegado de media onda, abierto tal como se ilustra en la fig 3.26 *(a)* hasta formar un diamante como en (b). También podría conseguirse doblando los extremos de dos dipolos simples separados entre sí un cuarto de onda, hasta formar un cuadrado como en *(c)*, o curvándolos hasta tener un círculo como en *(d)*.

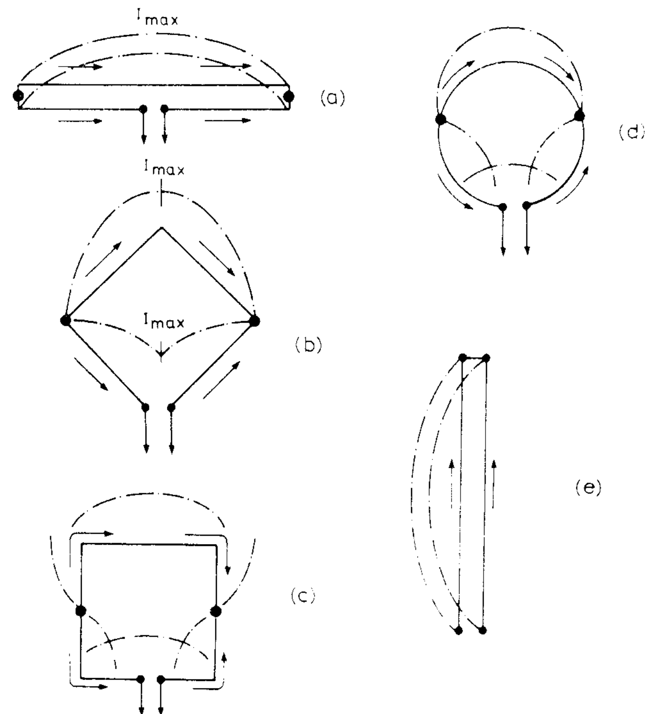


Fig. 3.26.– Deducción de las antenas de bucle cuadradas, rómbicas y circulares. Las flechas indican la dirección de las corrientes y los puntos gruesos, los lugares de alta impedancia (tensión máxima).

Este proceso de remodelación se traduciría finalmente en una sección de extremo abierto de una línea de transmisión de una longitud de media onda, la cual, excitada en una de sus ramas, se convertiría en un dipolo plegado alimentado en su extremo, como en el caso de la antena vertical omnidireccional Slim Jim descrita en el capítulo 2.

Por consiguiente, no hay nada misterioso en las antenas de cuadrete, aunque hay que conceder al radioaficionado americano W91ZX el mérito de su descubrimiento en 1939.

Los bucles cuadrados, circulares y rómbicos de una longitud de onda constituyen un estudio interesante en las posibilidades de las antenas de ganancia relativamente alta. Los bucles de esta naturaleza tienen un gráfico, de radiación similar al de un dipolo: una octoide. Ello no obstante, tienen una ganancia de 1,4 dB respecto al dipolo y se prestan muy bien a la adición de directores y reflectores lineales. El factor Q de los bucles cerrados de esta naturaleza no es muy elevado, por lo que también funcionarán en bandas de frecuencia relativamente anchas. La ganancia en función del número de sus elementos y de la longitud de la antena ha sido siempre motivo de controversia, especialmente cuando se intenta comparar el rendimiento de antenas cuadretes con las yagi. En puridad, no hay mucho que elegir entre ambas y el único problema real en la primera es que su construcción resulta algo más difícil.

Cuadrete de dos elementos

Tal vez sea ésta la más sencilla pero eficaz de las muchas que se pueden deducir de elementos cuadrados. Tiene una ganancia de unos 6 dB respecto al dipolo y por ser de alimentación en la base de uno de los elementos su disposición es como se indica en la fig. 3.27, con polarización horizontal. Para polarización vertical basta con hacer girar la antena 90°, con lo que el punto de alimentación queda a un lado. La separación entre reflector (elemento próximo más largo) y el activo no es crítica, y el ajuste entre 0,15 y 0,25 λ bastará para asegurar una ganancia frontal máxima, junto con una ROE mínima.

El punto de alimentación tiene que estar perfectamente cubierto, con el fin de impedir que entre agua en él y el extremo del

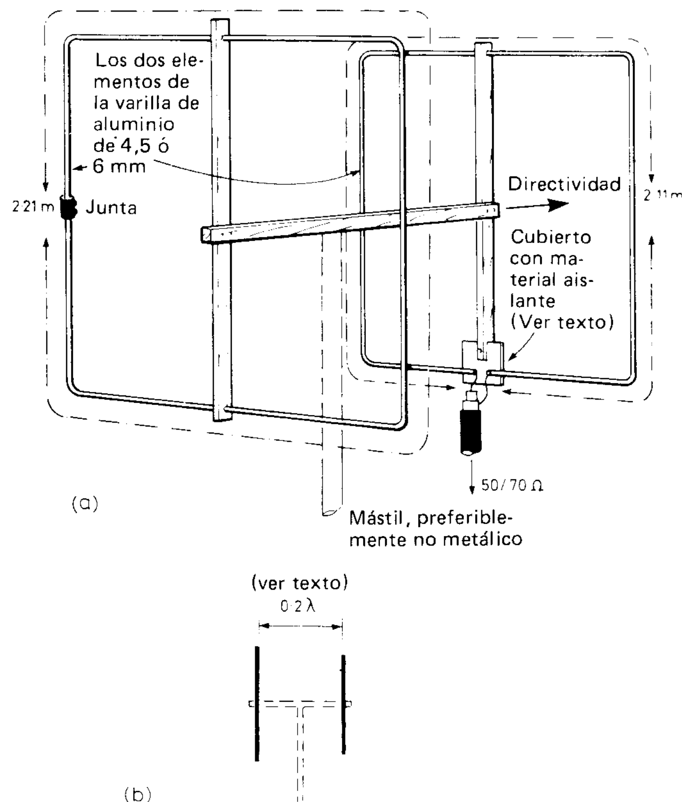


Fig. 3.27.– (a) Detalles constructivos de un cuadrete sencillo de dos elementos. (b) Separación entre elementos (véase el texto).

cable coaxil, función para la que servirá una caja de plástico. Los extremos superiores de los bucles pueden ir sujetos directamente al marco de madera, como se indica, ya que son puntos de corriente máximo y de impedancia prácticamente nula. El marco puede construirse con listones cuadrados de 12 ó 18 mm, a los que se

les darán dos o tres manos de barniz para protegerlos de la intemperie. La sección de mástil utilizada para soporte de la antena deberá ser preferiblemente de material no conductor, sobre todo si la antena ha de emplearse con polarización vertical.

Pueden usarse más directores si se quiere una mayor ganancia y éstos serán por lo general un poco más cortos que el elemento activo, con una separación aproximada de 0,15 λ delante de ese elemento y entre los directores. La separación para conseguir la ganancia máxima se hallará mediante un medidor de intensidad de campo y con la antena montada unos metros por encima del suelo en terreno libre de obstáculos. Los elementos del cuadrete pueden hacerse todos del mismo tamaño, es decir, de una longitud de onda todo a su alrededor y se sintonizan mediante adaptadores situados en el punto central, con dichos adaptadores cerrados para los reflectores y abiertos para los directores, como se indica en la fig. 3.25. La longitud de los adaptadores no necesita ser más de λ/8 para las bandas normales de sintonía.

Cuadrete de doble diamante (rombo)

Es ésta una forma de antena de cuadrete desarrollada por el autor, deduciéndola de un dipolo plegado doble, como se ve en la fig. 3.29 *(a)*, donde las flechas indican el sentido de circulación de la corriente por cada elemento, que según se aprecia están en fase.

Abriendo una de estas antenas como en *(b)*, se tienen en realidad dos dipolos plegados, uno de los cuales alimenta al otro en los lugares de alta impedancia marcados por los puntos. La circulación de la corriente sigue siendo la misma, es decir, en una dirección a lo largo del doble bucle y, por tanto en fase.

Uno de estos bucles puede alimentarse en un punto de gran corriente y baja impedancia, como en *(b)*, y tendrá en sí una ganancia de 1,5 dB sobre el dipolo simple. Pero dos bucles dobles de esta naturaleza, lo mismo que cualquier otro par de elementos radiantes, pueden excitarse juntos con diversas intensidades de fase, ajustándolos y separándolos de forma que uno de ellos se comporte como reflector excitado y el otro como director excitado, como en el caso de la ZL especial. Se consigue la ganancia frontal máxima cuando los dos bucles dobles están excitados de

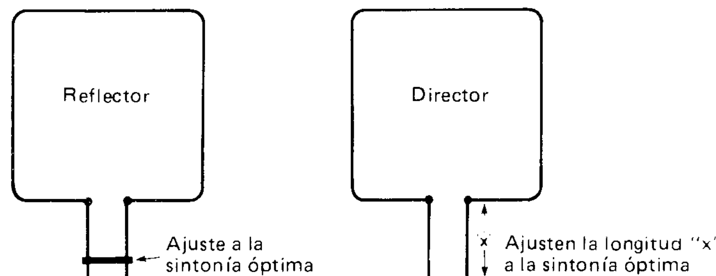


Fig. 3.28.– Método para sintonizar los directores o reflectores del mismo tamaño físico que el activo de un cuadrete.

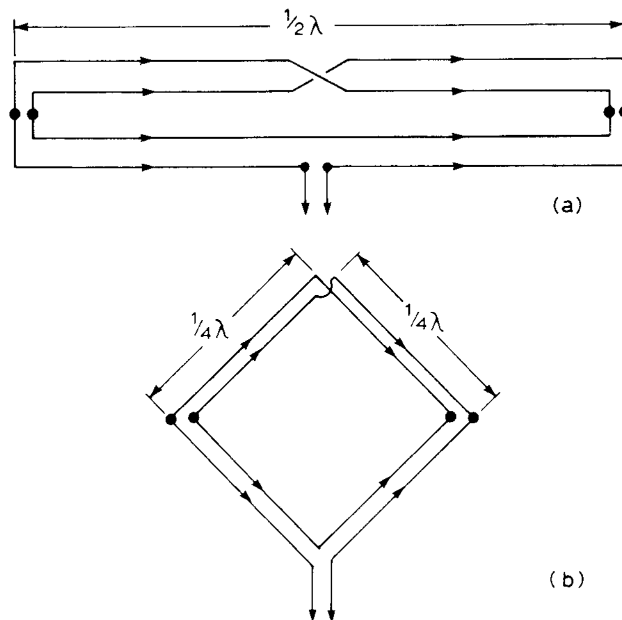


Fig. 3.29.– Deducción del radiador de bucle de doble rombo, partiendo de un doble dipolo plegado.

manera que haya un desfase de 135° entre ellos y su separación es de 0,125 λ aproximadamente.

El resultado final es el representado en la fig. 3.30, en la que también se incluyen las dimensiones para funcionamiento en 2 metros. El cable de alimentación puede ser de 50 Ω (coaxil) y el condensadorcito C_x, de aire, tendrá un valor de unos 20 pF como máximo. Es muy importante que los bucles dobles se crucen tal como se indica.

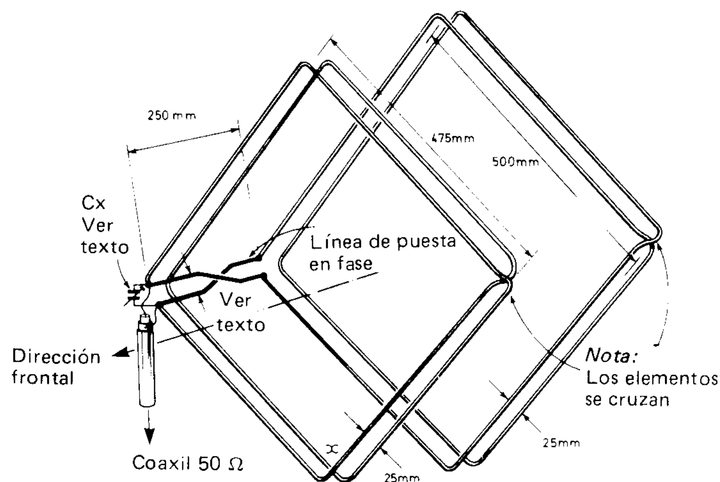


Fig. 3.30.– Dimensiones de los elementos activos, línea de puesta en fase, etc. de la antena de doble rombo.

Un método de construcción es el esquematizado en la fig. 3.31. en la que el marco de soporte está hecho de listones de sección cuadrada de 12 a 18 mm. Con el punto de alimentación en un lado, como en los dos dibujos, la polarización será vertical, pero si la antena se orienta de manera que el punto de alimentación quede en la parte inferior, como se indica en la fig. 3.30, punto X, la polarización será horizontal. El único ajuste necesario es el del condensador C_x, que deberá reglarse de modo que se obtenga la ROE mínima con el cable ya cortado a la longitud real que ha de tener con la antena instalada en su lugar definitivo.

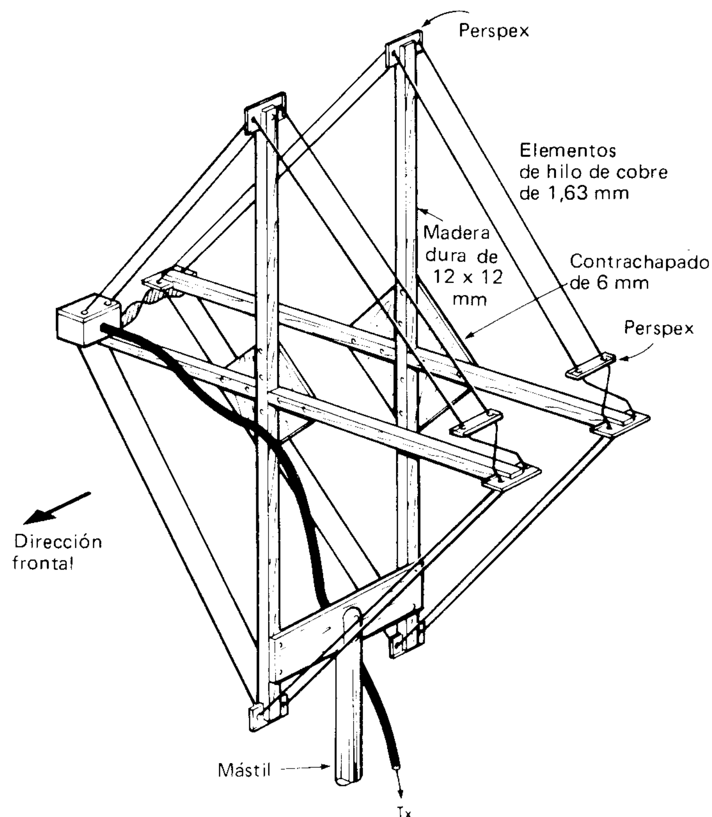


Fig. 3.31.– Método que se sugiere para la construcción de la antena de doble rombo.

Como es natural, esta antena es directiva y su gráfico de radiación vertical es el representado en la fig. 3.32, siendo su anchura mitad de haz de unos 52°. La ganancia sobre el dipolo es de unos

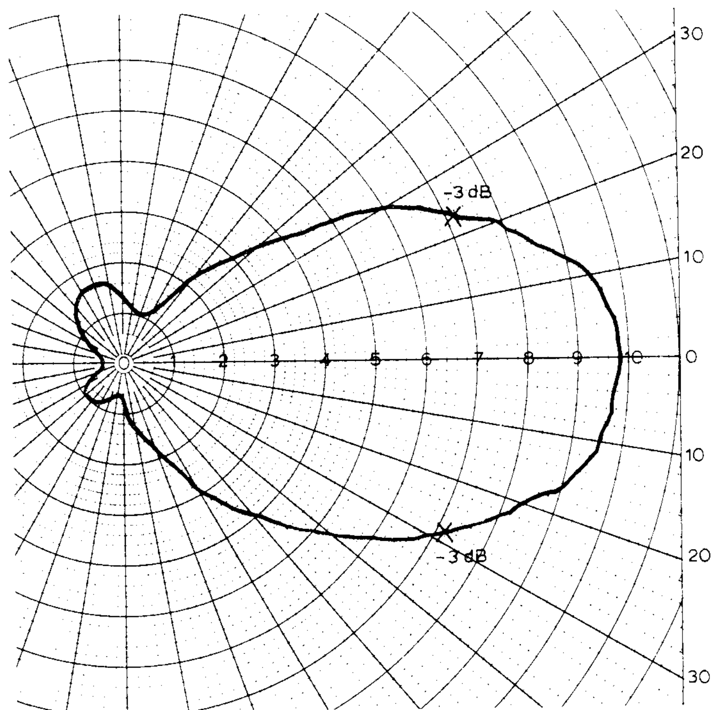


Fig. 3.32.– Gráfico de radiación de la antena de doble rombo con polarización vertical. La ganancia frontal es de unos 8 dB respecto al dipolo.

8 dB, que es bastante considerable para una antena de tamaño tan pequeño, pero que podría aumentarse utilizando directores pasivos de la misma configuración, es decir, de forma rómbica, pero integrados por un solo bucle.

Funcionamiento con satélite

Los aspectos referentes al funcionamiento en estaciones repetidoras de satélite espacial no son de la incumbencia de este libro.

La información referente a las frecuencias de funcionamiento y otros datos pueden solicitarse a la organización AMSAT. Por cuanto se refiere a las antenas, un simple dipolo o un plano de tierra permitarán señales bastante buenas cuando el satélite pasa sobre nosotros, pero para trabajos a larga distancia hay que considerar el empleo de una antena de pequeño ángulo. Las compactas por el estilo de la ZL especial descrita en el capítulo 3 resultan muy idóneas.

La mayoría de los operadores de VHF usan alguna forma de antena dirigida, pero también con alguna inclinación hacia arriba, que suele ser del orden de los 15°. Cuando se trate de pasos de satélites con ángulos muy elevados, se conseguirán mejores resultados con un dipolo o dipolos cruzados montados sobre un reflector. Las organizaciones AMSAT de los diversos países les proporcionarán la literatura apropiada a petición y en ella se incluye no sólo lo relativo al funcionamiento real de los satélites sino incluso las antenas más adecuadas y los detalles acerca de la polarización.

Capítulo 4

CABLES DE ALIMENTACION Y ADAPTACION

Líneas de transmisión

Virtualmente, todos los cables que transporten energía desde una fuente hasta una carga pueden considerarse "líneas de transmisión". Por ejemplo, un par de hilos conectados a una batería por un lado y a una lámpara por el otro podrían suponerse tales. Si la línea de transmisión es larga, en ella se perderá energía, como consecuencia de la resistencia intrínseca, y este razonamiento es aplicable asimismo a la hora de llevar energía de un transmisor a una antena, aunque en este caso particular nos enfrentamos con corriente alterna y no con continua pura, y por ello aparecen otros problemas, dado que en las altas frecuencias sobre todo las líneas de transmisión tienen inducción y capacidad, que presentan una reactancia al paso de la corriente. Por eso, teniendo en cuenta la combinación de las reactancias inductiva y capacitativa, más la resistencia, todas las líneas de transmisión poseen una propiedad que se conoce por *impedancia característica.*

Como estamos tratando de la transmisión de energía en distintas frecuencias, también entran en consideración otros factores, tales como la longitud de onda y la velocidad, que en cierto modo se incluyen en las propiedades físicas de las líneas de transmisión. Aunque las pérdidas puramente resistivas no se pueden anular por completo, por ser algo inherente a todos los conductores, sí pueden tomarse medidas encaminadas a impedir las pérdidas por radiación, mediante una construcción cuidadosa de la línea y su

adaptación exacta a la fuente y la carga. Las pérdidas por radiación pueden evitarse utilizando dos conductores dispuestos de modo que queden lo suficientemente próximos entre sí para que sus campos eléctricos se anulen mutuamente y, por tanto, no se produzca radiación, pero esto sólo se puede conseguir si la impedancia característica de la línea es igual a la de la fuente y de la carga.

Los tipos más comunes de línea de transmisión son las de hilo abierto, que por lo general constan de dos conductores paralelos, separados una pequeña parte de longitud de onda, y las de cable coaxil, en las que uno de los conductores va efectivamente apantallado por el otro, aunque en todo lo demás se comporte eléctricamente como una línea abierta de dos hilos. El aspecto de estas dos líneas se da en la fig. 4.1. En *(a)* se representa la bifilar, con el sentido de las corrientes I_1 e I_2. Si la primera de ellas tiene en el punto A de la línea la misma amplitud que la I_2 en el punto opuesto B, los campos creados por ellas serán de igual amplitud, y como ambas circulan en sentidos opuestos el campo debido a I_1 estará desfasado 180° del originado por I_2. De todos modos, se necesita un tiempo determinado para que el campo de A llegue a B y viceversa, lo que significa que los campos pueden no estar exactamente desfasados 180° y habrá una pequeña radiación. Lo mejor que se puede hacer para impedirlo es tener las dos líneas lo más juntas físicamente que se pueda. En la práctica la separación entre las líneas se hace pequeña, dentro del margen de que se dispone, teniendo en cuenta su construcción y las frecuencias en que van a trabajar, considerando que, cuanto mayor sea ésta, menor puede ser la separación. Por ejemplo, con un par de hilos separados 150 mm, ese espacio es una fracción muy pequeña de una longitud de onda en la banda de 3 a 4 MHz, pero si pasamos a 144 MHz la diferencia de fase introducida por esa misma separación sería del orden de 26°, caso en el cual los dos campos no se anularían totalmente. Un 1 % de la longitud de onda es una buena guía para la separación de los hilos de una línea de transmisión, aunque en VHF puede tolerarse algo menos.

El segundo tipo de línea representado en la fig. 4.1 *(b)*, es el concéntrico o coaxil, que consta de un hilo rodeado de otro conductor en forma de tubo. El principio de funcionamiento sigue siendo el mismo: como consecuencia de la pequeña separación existente entre los dos conductores, el campo debido a la corrien-

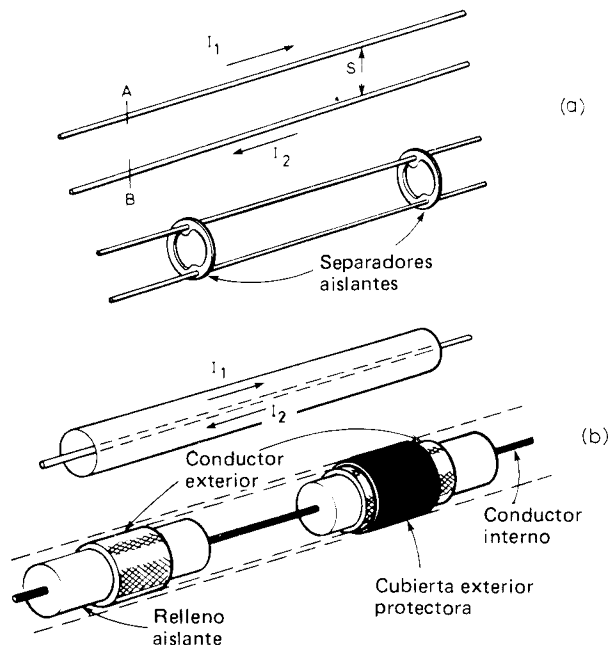


Fig. 4.1.– (a) Línea de transmisión abierta. (b) Línea de transmisión coaxil (véase la explicación en el texto).

te que circula por el interior se anula con el producido por el exterior. Las líneas coaxiles tienen otra propiedad, que es que, debido al llamado *efecto pelicular* (debido al cual la corriente tiende a circular por la superficie interior del conductor exterior, sin penetrar mucho en él), el campo total fuera del cable es despreciable, lo que tiene como resultado que el conductor exterior actúe a modo de pantalla del interior.

Velocidad en la línea

Conviene recordar que aunque las ondas de radio se desplazan en el vacío con una velocidad aproximada de 300.000.000 metros por segundo, no es lo mismo en los conductores, donde esa velocidad es más reducida. En las líneas coaxiles, la presencia de un dieléctrico distinto del aire reduce esa velocidad considerablemente. Los conductores separados y con aire entre ellos no quedan tan afectados y entonces el factor de velocidad suele ser cercano a la unidad.

Como la longitud de onda depende de la velocidad, la de una línea de transmisión será siempre menor que la de una longitud de onda equivalente en el espacio libre. Un factor de velocidad típico del cable coaxil es 0,66 de la longitud de onda en el espacio libre.

Impedancia característica

Las líneas de transmisión tienen lo que podría considerarse como capacidad e inducción distribuidas, debido a que cada longitud unitaria de ella tiene su propia cantidad de capacidad y de inducción. Por ello podríamos suponer que una línea de transmisión tiene un esquema eléctrico tal como el representado en la fig. 4.2 *(a)*. Cada sección pequeña de inductancia limita la velocidad con que se ha de cargar cada sección pequeña de capacidad, y el efecto resultante de todo ello es el de establecer una relación entre la tensión y la corriente, por lo tanto, la línea tiene una resistencia aparente en c.a., que es lo que se llama impedancia característica, que se representa por Z_0.

Los valores inductivos disminuyen al crecer el diámetro del conductor, en tanto que los capacitativos se reducen al aumentar la separación entre los conductores de la línea. Por eso, una línea compuesta por conductores de gran diámetro y muy juntos tendrá una impedancia característica relativamente baja, en tanto que otra de conductores más finos y separados la tendrá bastante alta. Las impedancias utilizadas corrientemente en las líneas del tipo bifilar suelen estar comprendidas entre 200 y 800 Ω, mientras que las de los cables coaxiles son de 15 a 175 Ω, aunque las más utilizadas en las aplicaciones de los radioaficionados son las de 50 y 75 Ω.

Adaptación de las líneas

Si tomamos una línea de transmisión de impedancia dada y la conectamos por un extremo a un generador de su misma impe-

dancia y por el otro a una carga puramente resistiva R y de valor equivalente al de la impedancia Z_0, como se indica en la fig. 4.2. *(b)*, toda la corriente que pase por la línea lo hará por la resistencia que, por cuanto se refiere a la corriente, es simplemente una prolongación de aquella. La resistencia pura no tiene reactancia inductiva ni capacitativa propias, y en este caso se dice que la línea está perfectamente adaptada, ya que de la energía generada $(I^2 Z_0)$ por una onda viajera de corriente y tensión que pase por ella y la carga no hay ninguna parte devuelta al generador.

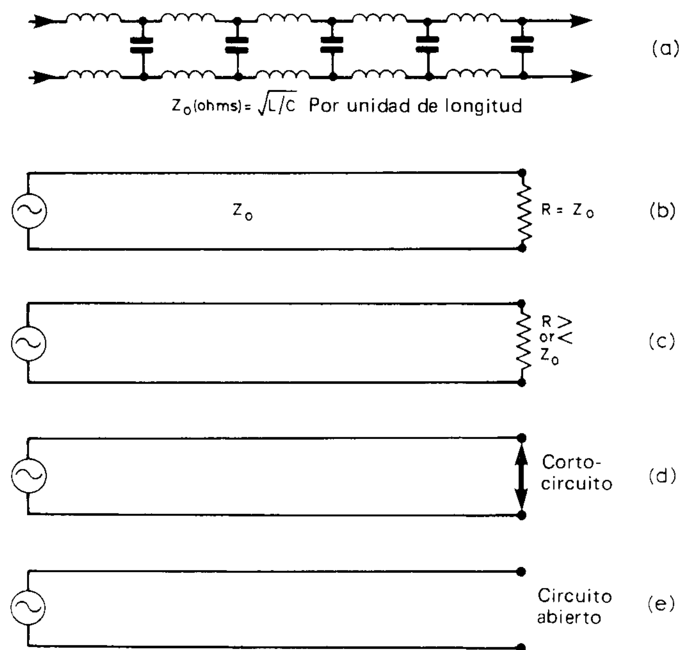


Fig. 4.2.– (a) Inducción y capacidad repartidas de una línea de transmisión. (b, c, d y e) Condiciones que determinan una adaptación o una desaptación de impedancias (véase el texto).

Una línea de transmisión infinitamente larga, de la misma impedancia en toda su longitud, se comportaría del mismo modo, aunque en este caso se disiparía potencia en la resistencia natural de la línea.

Si tomamos ahora el caso en que la resistencia de carga R no es igual a la impedancia de la línea (fig. 4.2, *c*), la potencia que no se disipa en la carga queda reflejada hacia el generador. Cuanto mayor sea la diferencia entre R y Z_0, menor será la cantidad de potencia absorbida por R y, por tanto, mayor la diferencia de adaptación. La potencia que llega a R se llama *incidente* y la devuelta a la fuente *reflejada.* Por eso podemos hablar de la razón entre la potencia reflejada y la incidente, que se hace mayor conforme aumenta la desadaptación. Cuando R es igual a un cortocircuito como en la fig. 4.2 *(d)*, se devuelve toda la energía, como es asimismo el caso si R equivale a un circuito abierto, como en *(e)*.

Cuando se produce una falta de adaptación aparece en la línea potencia debida a las ondas viajeras, en las dos direcciones. La amplitud de la potencia devuelta depende no obstante de las diferencias de fase entre las tensiones y corrientes incidentes y reflejadas, que interaccionan entre sí y crean lo que se conoce como *ondas estacionarias* en la línea.

Ondas estacionarias

Ya se ha explicado que cuando una línea de transmisión está terminada correctamente no hay reflexión de energía, y la circulación de tensión y corriente se dice que es una onda viajera. Pero si la línea no está bien terminada, la razón de la corriente a la tensión no es la misma en la carga y en la línea, por lo que la potencia enviada por ella no será absorbida toda por la carga. En ese caso, una parte de tal potencia será devuelta, produciéndose una onda viajera de retorno. Estas dos ondas –directa y reflejada– interaccionan a lo largo de la línea y, como consecuencia, originan una onda estacionaria.

Todo lo anterior queda ilustrado en la fig. 4.3. En *(a)*, un circuito abierto situado en el extremo de la línea impide que la

corriente pase de allí. La onda de corriente tiene en este punto una amplitud nula y efectivamente se compensa como consecuencia de la inversión de polaridad: se invierte la fase. La corriente circula por la línea, pero la tensión aparece en ella en toda su longitud y no queda invertida por esta reflexión. Los campos eléctricos de las dos ondas, directa y reflejada, se suman y dan una amplitud doble. En la fig. 4.3 *(b)* y (c) se representan condiciones similares, con R mayor o menor que Z_0, y por tanto se produce una onda estacionaria de amplitud menor, ya que en los dos casos sólo se refleja una parte de la potencia directa. En la fig. 4.3 *(c)* se indica la situación cuando $R = Z_0$, es decir, cuando no se refleja ninguna potencia, ya que toda ella pasa por la carga y en ella se disipa: se tiene entonces una onda viajera uniforme. En la parte inferior de la figura, en *(e)*, se ilustra un cortocircuito en el extremo de la línea y en este caso la amplitud de la onda estacionaria es la misma que en el de circuito abierto, con la salvedad de que ahora se ha desplazado para cumplir las condiciones de la tensión cero *(*V_{min}*)* en el extremo cortocircuitado de la línea.

La razón entre la tensión máxima (pico) y la mínima (nodo) de la onda estacionaria es lo que se conoce como *relación de onda estacionaria* (ROE), que es igual a la existente entre la carga y la impedancia característica *(*R/Z_0*)*, cuando R es mayor que Z_0 o Z_0/R cuando es menor). Si la adaptación es perfecta, lo que pocas veces sucede, la ROE es de 1 a 1; si no, su valor es mayor y puede llegar aproximadamente a infinito en las condiciones de cortocircuito o de circuito abierto, que, por otra parte, habrá de evitar, ya que la alta potencia reflejada podría dañar las etapas de salida transistorizadas del emisor.

Tipos de líneas de transmisión

Aunque hay dos tipos básicos de líneas de transmisión, sus variantes son numerosas. Por ejemplo, las líneas bifilares separadas pueden tener entre ellas aire como aislamiento o estar construidas con aislante de politeno o similar en toda su longitud, caso en el cual la línea suele ser de baja impedancia característica, que necesita tener los dos hilos muy juntos. También hay líneas de transmisión de tres y cuatro hilos, pero tienen pocas aplicaciones para los operadores de VHF, excepto tal vez para tipos de antenas especiales.

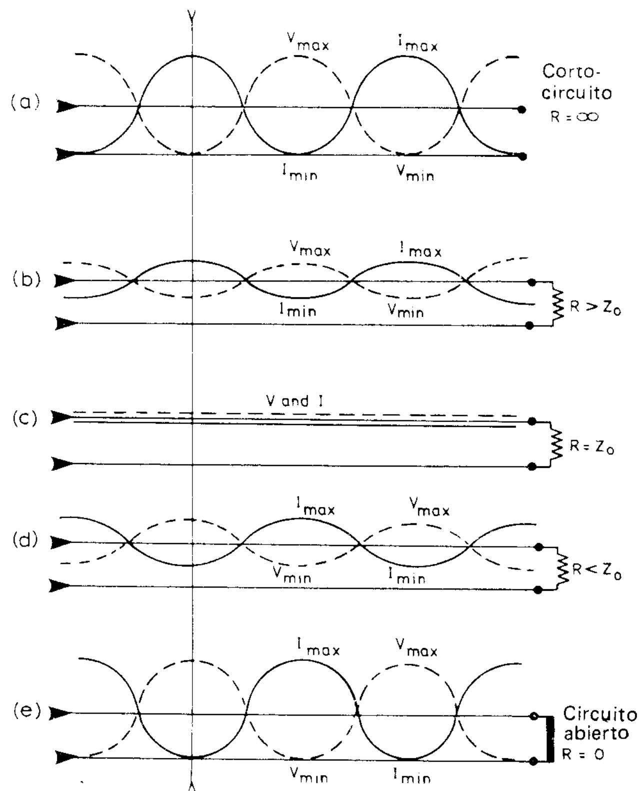


Fig. 4.3.– Formación de ondas estacionarias cuando (a, b, d, e) la impedancia de la línea no está adaptada a la de la carga. (c) Onda viajera cuando la R de la carga es igual que la Z_0 de la línea.

El tipo más popular de línea de transmisión es en la actualidad el cable coaxil, que, aunque tiene mayores pérdidas que las líneas abiertas, resulta mucho más conveniente para los radioaficionados, ya que no exige aislamiento de los soportes entre transmisor y antena, además de ser flexible.

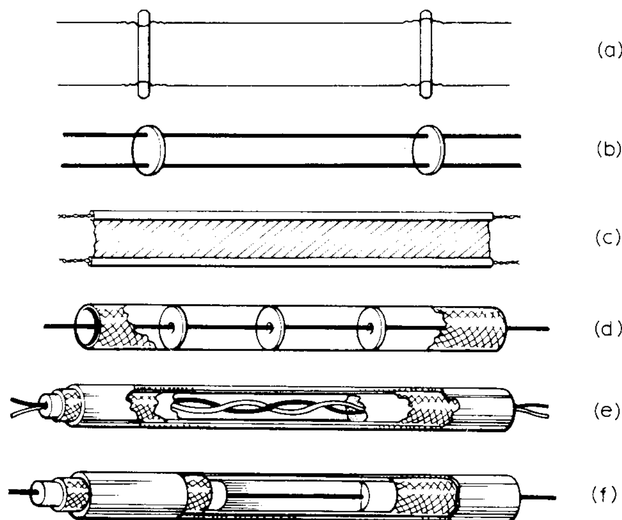


Fig. 4.4.– Construcción de varios tipos de líneas de transmisión. (a, b) Línea abierta; (c) línea plana bifilar de 300 Ω; (d) coaxil con aislamiento de aire; (e) coaxil con semi-aislamiento de aire; (f) coaxil con aislamiento sólido.

Las líneas de transmisión de hilos separados (fig. 4.4, *b* y *a*) se usan poco, excepto en los casos de conjuntos muy grandes de antenas, dada la dificultad que implica su sujeción y el mantenerlas completamente aisladas en todo el recorrido hasta la antena. De todos modos, las líneas con aislamiento de aire son las que tienen las pérdidas menores por longitud dada, aunque en VHF exigen conductores de diámetro bastante grande y muy juntos, incluso para impedancias del orden de 500 a 600 Ω.

Puede conseguirse una idea de las exigencias físicas examinando la fig.4.5, en la que se dan las impedancias características correspondientes a varios diámetros y separaciones. Este gráfico se basa en la fórmula $276 \log_{10} D/d$, siendo D la separación entre los hilos (entre sus centros) y d el diámetro del hilo. Por ejemplo, con dos conductores separados 50 mm y de un diámetro de 6 mm, la impedancia característica valdrá $276 \log_{10} 50/6{,}25 = 332\ \Omega$, aprox. Del gráfico de la fig. 4.5 y para una razón separación/diámetro de 8, se tiene la impedancia marcada X.

La alternativa del cable bifilar con dieléctrico de aire es la que se conoce popularmente con el nombre de "alimentador de cinta", que consta de dos conductores de hilo dividido rodeados de un aislante de politeno y una cinta del mismo material a todo lo largo, destinada a mantener separados los hilos a una distancia igual e invariable, de unos 12 mm (fig. 4.4, *c*). La versión más utilizada de este tipo de alimentador tiene una impedancia de 300 Ω, pero también hay líneas similares bifilares de 70 Ω. Estos cables no se usan mucho para el trabajo en la banda de 2 metros, ya que la mayoría de los transceptores comerciales (cajas negras japonesas) tienen salida coaxil, de una impedancia de 50 Ω. Con antenas de distinta impedancia se suele recurrir a algún elemento adaptador, conservando de ese modo la posibilidad de utilizar cable de alimentación coaxil de 50 Ω.

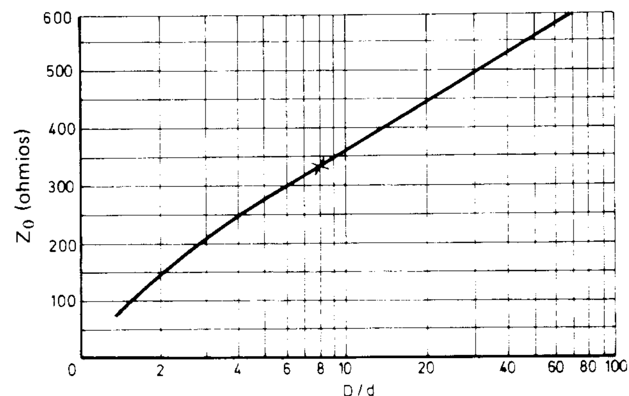


Fig. 4.5.– Gráfico para determinar la impedancia de líneas de transmisión abiertas con respecto a la separación D de los hilos y el diámetro d de éstos (basado en la fórmula $276 \log_{10} D/d$).

Los cables coaxiles se tienen disponibles en una gran variedad de formas, tales como la de dieléctrico de aire, muy cara (fig. 4.4, *d*) y por ello poco usada por los radioaficionados, y la que podríamos llamar de dieléctrico casi de aire (fig. 4.4, *e*), ya que el conductor de hilo dividido está devanado con una línea de politeno y encerrado en un tubo de material similar. Este tipo de cable es más caro que los mejores de dieléctrico sólido, pero vale la pena, si se trata de largos recorridos, en los que las pérdidas pueden llegar a ser considerables (sobre todo en 432 MHz). Los restantes tipos de cable coaxil son de la variedad de aislante sólido (fig. 4.4, *f*), formados por un conductor interno macizo o de hilo dividido, moldeado en el dieléctrico. Con los tipos de mejor calidad las pérdidas resultan aceptables, excepto en los casos de recorridos largos –como ya hemos dicho–, aproximadamente de más de 20 m. De todos modos, no es buena política usar cables de inferior calidad, aunque se trate de recorridos cortos, y algunos de los dichos pueden llegar a tener unas pérdidas de 6 dB cada 30 m, operando en 145 MHz. La consecuencia de su empleo sería que una antena de una ganancia de 6 dB, usada con ese cable, radiaría al final muy poca más potencia que un simple dipolo con cable de muy bajas pérdidas.

Elementos de adaptación

Una adaptación defectuosa entre el cable de alimentación y la antena se traduce en una gran ROE y, por tanto, pérdida de potencia radiada. Las líneas de transmisión más corrientes son del tipo coaxil en VHF, de una impedancia de 50 ó 70 Ω, y quizá los bifilares de 300 Ω, que servirán directamente con muchos tipos de antenas, aunque con otros exigirán algún dispositivo de adaptación. En ocasiones se necesita una alimentación simétrica con cables coaxiles, aunque sólo sea para evitar que la r.f. regrese por la malla exterior de blindaje. Por ejemplo, un cable coaxil de 70 Ω se adaptará exactamente a una antena dipolo, pero ésta es una carga simétrica que, como es lógico, necesita un alimentador también simétrico. Las líneas coaxiles de un solo conductor son asimétricas. Por consiguiente, hay que buscar el modo de convertirlas en simétricas, lo que se consigue utilizando un transformador simétrico-asimétrico, al que a veces se le da el nombre de "bazooka".

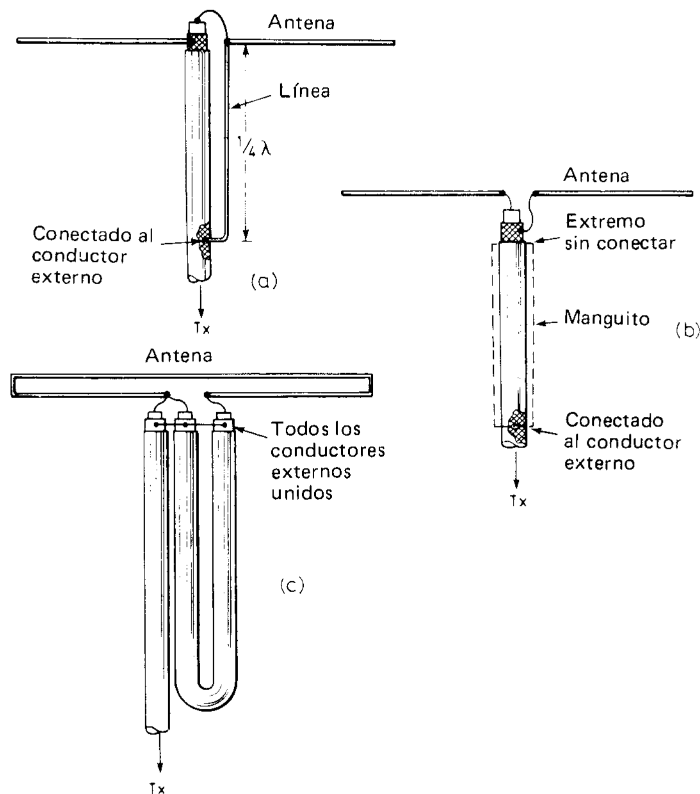


Fig. 4.6.– Sección de línea en cuarto de onda para conseguir una alimentación simétrica para un dipolo desde un cable coaxil asimétrico. (b) Manguito en cuarto de onda para conseguir una adaptación simétrica como en (a). (c) Llamado a veces balun de 4 a 1, debido a la razón de elevación de impedancia que proporciona, a la vez que una alimentación simétrica.

Su forma puede ser como la representada en la fig. 4.6, donde el de *(a)* es una sección en cuarto de onda de líneas, en paralelo con la última parte de λ/4 del cable, y el de *(b)* es un adaptador

de cuarto de onda, incluido asimismo en la última parte de λ/4. El método consiste en presentar una alta impedancia a la r.f. al final del cable, para evitar que pase ninguna corriente al conductor exterior de la línea. La longitud del adaptador o sección de línea añadida es de un cuarto de onda, por lo que en esta aplicación no hay factor de velocidad alguno que intervenga. Obsérvese que con el tipo de adaptador mencionado no hay conexión entre él y el cable coaxil en la parte superior, es decir, junto a la antena. Unicamente la parte inferior del adaptador se conecta a la malla del conductor exterior del cable alimentador. En realidad, ese adaptador puede estar provisto de malla, procedente de un trozo de cable coaxil de mayor diámetro, colocada sobre la cubierta exterior del alimentador de antena.

Otra forma de transformador simétrico-asimétrico, llamada comúnmente "balun" (que en realidad no es más que un acrónimo inglés de "balance to unbalance", es decir, "simétrico-asimétrico), consta de una sección de media onda de cable alimentador de la misma impedancia que el principal, acoplada tal como se indica en la fig. 4.6 *(c)*, y que proporciona una elevación de la impedancia de un valor aproximado de 4 a 1 desde su impedancia propia. Pero en este caso la longitud de media onda de línea ha de tener en cuenta el factor de velocidad del cable, que para casi todos ellos es de 0,66. La longitud de cable necesaria para el bucle (véase la ecuación de la pág. 26) será pues de $(150 \times 0{,}66)/f$ metros. Un *balun* de esta naturaleza podría utilizarse para alimentar un dipolo plegado directamente desde un cable coaxil de 50 ó 70 Ω con una adaptación bastante buena.

Hay otra forma de balun que puede proporcionar un aumento de impedancia. Se trata de un dispositivo capacitativo-inductivo, pero es bastante difícil de hacer y ajustar. Un circuito para su empleo en 145 MHz es el que se da en la fig. 4.7 *(a)*, junto con los detalles de los valores de los componentes. Este circuito servirá para adaptar cargas simétricas de la región de 100 a 160 Ω a líneas coaxiles de 50 ó 70 Ω. Habrá que hacer algún ajuste de los puntos de derivación de L_2 para impedancias en la salida inferiores a 100 Ω, llevando esa derivación más hacia el centro.

Obsérvese que la bobina L_1 está devanada en el centro de L_2 y tiene que estar lo más junto a ella que se pueda, con tal que no se toquen. Para su funcionamiento en 2 m, L_2 es de 5 espiras de hilo de 2,64 mm de diámetro, de cobre estañado, devanadas en una forma de 12 mm de diámetro y estirada hasta alcanzar una longitud total de 21 mm. Las derivaciones están a 1,5 espiras de cada extremo. La bobina de acoplo L_1 es de 2 espiras de hilo de cobre estañado de 2,03 mm de diámetro, devanadas en una forma de 25 mm, con las espiras separadas 3 mm entre sí. Puede colocarse en el centro de L_2, con la cantidad de aire necesaria entre ambas (fig. 4.7, *b*). Todo el circuito puede alojarse en una cajita de aluminio de unos 150 x 75 x 75 mm, provista de los conectores coaxiles apropiados en cada extremo.

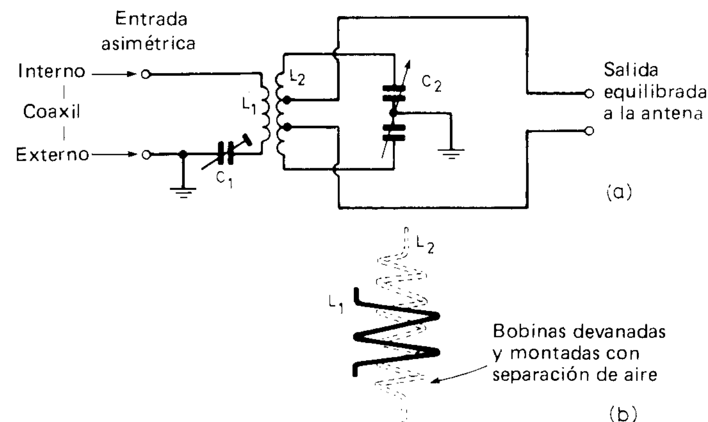


Fig. 4.7. – (a) Circuito de un balun inductivo-capacitativo para 145 MHz. (b) Obsérvese cómo se devana la bobina sobre L_2 pero separadas aunque lo más juntas posible.

El dispositivo tiene que emplearse junto con un indicador de ROE conectado entre el transmisor y la línea de alimentación coaxil. Ajusten C_1 y C_2 hasta obtener la ROE más baja posible. De no llegar a una cifra razonable, podrán cambiarse las derivaciones de L_2 a otra posición.

Métodos corrientes de adaptación

Hay muchas formas de conseguir una buena adaptación entre una línea de transmisión y una antena. Las que damos a continuación son de las más corrientes, aunque algunas ya han aparecido en capítulos anteriores como parte más o menos integrante de alguna antena determinada (como ejemplo, el adaptador de cuarto de onda y el gamma).

Adaptador delta

En este método, la línea de transmisión, que suele ser del tipo de hilo abierto, se abre en el extremo que se une a la antena, tal como se indica en la fig. 4.8 *(a)* y se conecta a puntos situados a distancias iguales del centro. Aunque tiene el ligero inconveniente de que la parte abierta puede radiar y es crítica por cuanto a la frecuencia se refiere, resulta de ajuste relativamente fácil y es adaptable a línea de transmisión coaxiles o abiertas.

El ajuste a la ROE mínima se efectúa alterando la longitud de la sección abierta y los puntos en que los hilos se juntan con la antena. Utilizado con cables coaxiles de 50 ó 70 Ω de impedancia puede usarse con un balun (4 a 1), tal como en la fig. 4.8 *(b)*. El ajuste a la ROE mínima es el mismo y en los dos casos la longitud de los "lados" de la delta y la sepración entre los puntos de unión será del orden 0,15 λ, basándose en la longitud de onda en el aire.

Adaptador gamma y en T

Se trata en realidad de una variación del adaptador delta con el T para su empleo con líneas abiertas, como en la fig. 4.8 *(c)*, y con el gamma para las coaxiles, como en *(b)*.

El método de adaptación en T ofrece una notable flexibilidad para conseguir distintas razones de impedancia, a la vez que es un sistema simétrico. También podría usarse con un balun 4 a 1 y cable coaxil de 50 ó 70 Ω. La impedancia de entrada crece con la longitud de la sección adaptadora *L*, aunque una vez que se excede de cierto límite la impedancia dicha disminuye al aumentar *L*.

La separación *S* también influye en la impedancia del alimentador. La sección del adaptador en T, *L*, deberá ser de unos

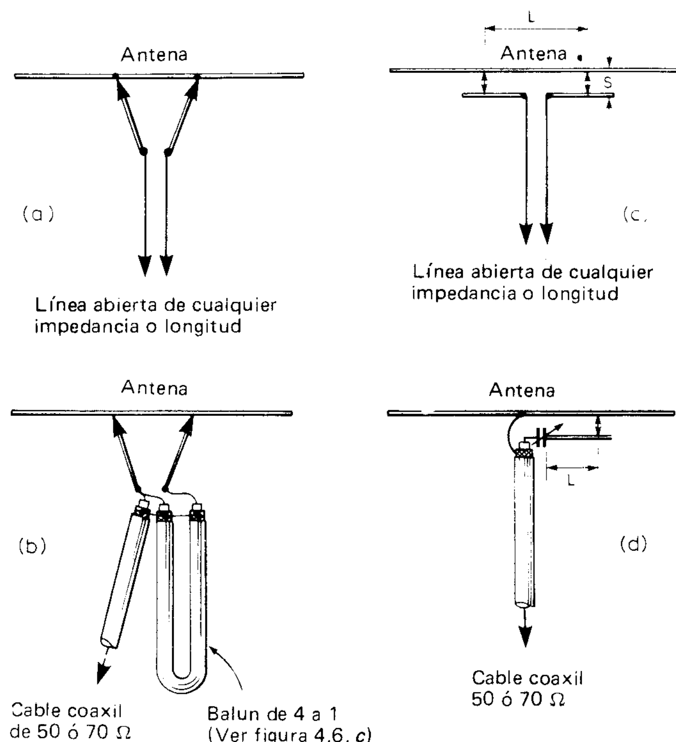


Fig. 4.8.– (a) Adaptación en delta con línea de transmisión abierta. (b) La misma, con línea coaxil y balun 4 a 1. (c) Adaptación en gamma con línea de transmisión abierta (véase el texto en cuanto a sus ajustes). (d) La misma, con línea coaxil (véase el texto).

450 mm de longitud, con el fin de permitir el ajuste de las conexiones al elemento de antena para obtener una ROE mínima. La separación S será de unos 50 mm si se usa tubo fino en la antena y en la sección adaptadora T.

Adaptador gamma

Es el que se representa en la fig. 4.8 *(d)* y resulta muy apropiado para la adaptación de cable coaxil de 50 ó 70 Ω al elemento activo de una antena de varios. El conductor exterior del cable coaxil se conecta al punto medio de la antena, en tanto que el interior va, por intermedio de un condensador de poca capacidad, a una sección adaptadora corta, cuya longitud será de unos 100 mm en el caso de 145 MHz. Esta sección podría hacerse un poco más larga, proporcionándose una toma variable del mismo modo que en el adaptador en T.

El condensador, que será de dieléctrico de aire y de unos 25 pF para 145 MHz. sirve para sintonizar la reactancia de la sección adaptadora. La conexión entre esta sección y la antena y el condensador se ajusta hasta conseguir la ROE mínima.

Otros métodos de adaptación

Algunos de los métodos utilizados son en efecto parte del diseño de la antena en sí, pero deducidos de uno de los principios básicos de los apartados anteriores. Lo mismo sucede en el caso del adaptador "Q", que es una sección de línea de transmisión de impedancia dada, utilizada en ocasiones como "transformador" para obtener una adaptación de baja impedancia. No se emplea mucho en los tipos de antenas más populares de VHF, pero los detalles de su funcionamiento y su construcción pueden hallarse en la literatura incluida en la bibliografía de este libro.

El dipolo plegado como dispositivo adaptador

El dipolo plegado puede utilizarse como dispositivo adaptador, aunque pueda funcionar en realidad como elemento activo en las antenas provistas de elementos parásitos, como suele ser el caso. Un dipolo plegado (dos elementos) por el estilo del de la fig. 4.9 *(a)* tiene una impedancia en su centro de unos 300 Ω, pero en presencia de otros conductores, como ocurre en los conjuntos parásitos, esta impedancia puede reducirse hasta unos 70 Ω, lo que permitiría su adaptación directa a una línea de transmisión coaxil de esa misma impedancia. Si se necesita una impedancia superior a los 300 Ω, por ejemplo para adaptar una línea

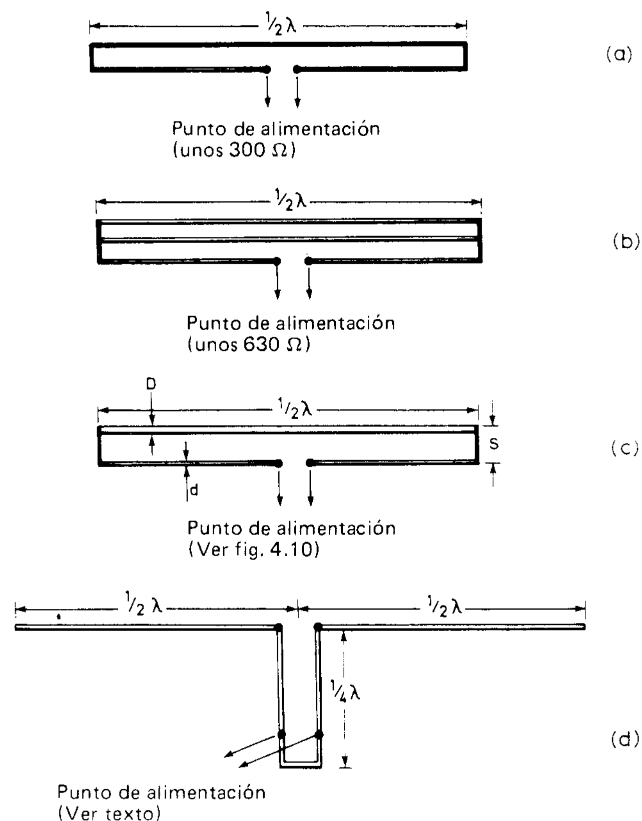


Fig. 4.9.— (a) El dipolo plegado permite una alimentación directa de 300 Ω con cable bifilar plano o coaxil utilizado con un balun de 4 a 1. (b) Un dipolo plegado de tres hilos permite la alimentación directa con una línea de transmisión abierta de 600 M. (c) Un dipolo plegado con elementos de distinto diámetro y separación variable admite una amplia gama de impedancias de alimentación, como se indica en el texto y en la fig. 4.10. (Véase en el texto la referencia a d.)

abierta de 600 Ω a un dipolo plegado usado solo, la impedancia de su punto central puede subir hasta unos 630 Ω añadiéndole otro elemento en paralelo, como en la fig. 4.9 *(b)*, lo que es ya un valor lo suficientemente cercano a 600 Ω como para considerarse correcta la adaptación.

Añadiéndole otros elementos más en paralelo podrá conseguirse elevar más aún la impedancia, pero un método mejor de obtener este aumento de impedancia consiste en usar dos elementos, uno de los cuales tenga un diámetro mayor que el otro, lo que, junto con la separación entre ambos, podrá aprovecharse para alcanzar razones de ampliación comprendidas entre 2 y 15 a 1. El aspecto se da en la fig. 4.9 *(c)* y las razones de impedancia obtenibles con diversos diámetros y separaciones se indican en la fig. 4.10.

Para conseguir una razón de impedancias determinada hace falta conocer dos factores: uno de ellos es la razón D/d (D = diámetro del elemento más grueso; d = diámetro del elemento más fino). La separación S entre los dos se divide por d para obtener el otro factor, S/d. Utilizando los gráficos de la fig. 4.10, el ejemplo dado en ella por las líneas de trazos se deduce de:

$$\frac{D}{d} = \frac{24 \text{ mm}}{6 \text{ mm}} = 4 \quad \text{y} \quad \frac{S}{d} = \frac{100 \text{ mm}}{25 \text{ mm}} = 4$$

que es un aumento de impedancia de 7 a unos 2100 Ω. Supongamos no obstante que con un dipolo plegado en presencia de otros conductores, como en el caso de las yagis, su impedancia propia se reduce a 40 Ω. El empleo de distintos diámetros en los elementos y diversas separaciones como antes se ha dicho podría elevar la impedancia a 40 x 7 = 280 Ω, que sería una buena adaptación para alimentador bifilar de cinta de 300 Ω.

El adaptador de cuarto de onda

Los adaptadores abiertos y cerrados en cuarto de onda se usan mucho como elementos de adaptación y su aplicación más corriente es la indicada en la fig. 4.9 *(d)*, en la que hay que alimentar en fase dos dipolos de media onda como si fuesen una antena colineal. El adaptador proporciona un medio de conseguir una alimenta-

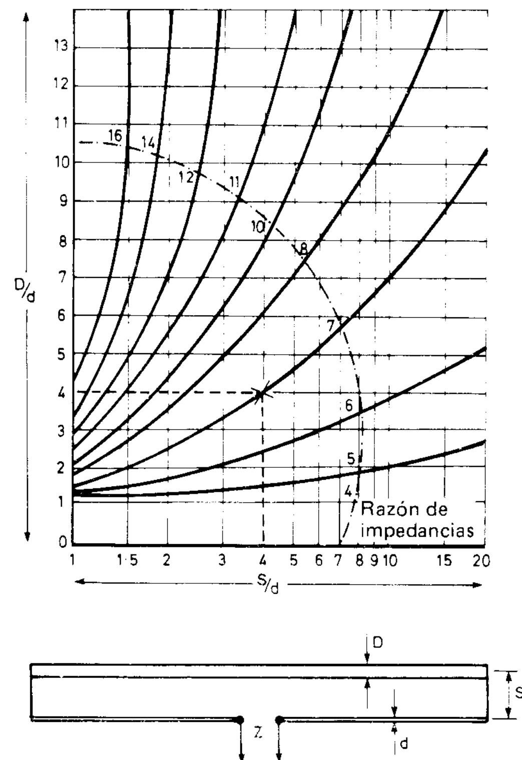


Fig. 4.10.– Diferentes razones de impedancia que se pueden obtener modificando los diámetros y separación de los elementos de un dipolo plegado.

ción de baja impedancia (50 a 70 Ω) en un caso en que de lo contrario habría una alta impedancia (debido a la alimentación en extremos de cada dipolo). Los puntos de alimentación se ajustan experimentalmente, ya que dependen de la impedancia del cable usado, para conseguir la ROE mínima. El adaptador de cuarto de onda se usa en muchas de las antenas descritas en los capítulos 2 y 3.

CARACTERISTICAS DE LOS CABLES COAXILES

Grupo de impedancia	50	50	50	50	50	50	50
Nº de lista BICC	TT3346 TT3345	—	—	—	—	—	T3234
Nº servicio BS2316-UNIRADIO (UR)	74/75	4	67	43	76	115	—
Impedancia característica (Ω)	51	46	50	52	51	52	52
Capacidad nominal (pF/ft)	30.7	33	30	29	29	29	22.5
(pF/m)	100	108	98	95	95	95	74
Razón de velocidad nominal	0.664	0.666	0.666	0.674	0.674	0.674	0.82
Atenuación nominal en (dB/100ft/MHz) (dB/30m/MHz) — MHz 100	0.96	2.26	2.07	3.95	5.1	3.95	2.6
200	1.45	3.45	3.02	5.69	8.04	5.69	3.6
300	1.86	4.33	3.8	7.06	10.9	7.06	4.5
600	2.93	7.48	5.66	10.3	19.3	10.3	6.5
Disipación máxima en (Kw/en aire/MHz) — MHZ 100	1.9	0.6	0.54	0.13	0.13	0.17	0.20
200	1.3	0.42	0.37	0.185	0.082	0.12	0.14
300	0.99	0.3	0.3	0.23	0.06	0.098	0.11
600	0.64	0.23	0.2	0.34	0.034	0.068	0.08
Tensión máxima de r.f. (kV nico)	15	4.75	4.8	2.75	1.8	2.75	0.7
Diámetro exterior cable (pulg.)	0.870	0.405	0.405	0.195	0.195	0.285	0.270
(mm)	22.1	10.3	10.3	5.0	5.0	7.2	6.9
Sirve para radioaficionados VHF/UHF	VHF y UHF	UHF distancias cortas	VHF	UHF distancias cortas	UHF distancias cortas	UHF distancias cortas	VHF

CARACTERISTICAS DE LOS CABLES COAXILES (Cont.)

Grupo de impedancia	75	75	75	75	75	75	75
Nº de lista BICC	—	T3365	—	—	—	T3141	—
Nº servicio BS2316-UNIRADIO (UR)	77	—	!	57	59/65	—	39
Impedancia característica (Ω)	75	72	72	75	75	75	69
Capacidad nominal (pF/ft)	20.5	21.3	21.2	20.6	20.6	20.5	23
(pF/m)	67	70	69	68	68	67	75
Razón de velocidad nominal	0.664	0.666	0.666	0.666	0.666	0.666	0.674
Atenuación nominal en (dB/100ft/Mhz) (dB/30m/MHz) — MHz 100	0.95	1.7	1.74	1.87	1.87	3.1	2.5
200	1.45	2.45	2.65	2.74	2.74	4.4	3.63
300	1.86	3.1	3.34	3.45	3.45	5.5	4.54
600	2.93	4.5	5.67	5.17	5.17	8.1	6.72
Disipación máxima en (kW/en aire/MHz) — MHZ 100	1.6	0.65	0.64	0.55	0.55	0.31	0.36
200	1.05	0.45	0.42	0.375	0.375	0.22	0.25
300	0.84	0.35	0.33	0.3	0.3	0.17	0.2
600	0.545	0.24	0.2	0.2	0.2	0.12	0.13
Tensión máxima de r.f. (kV pico)	12.5	6.5	6.25	5.0	5.0	3.0	4.0
Diámetro exterior cable (pulg.)	0.870	0.642	0.450	0.405	0.405	0.310	0.310
(mm)	22.1	16.3	10.3	10.3	10.3	7.9	7.9
Sirve para radioaficionados VHF/UHF	VHF y UHF	VHF y UHF distancias cortas	VHF y UHF distancias cortas	VHF y UHF distancias cortas	VHF y UHF distancias cortas	VHF	VHF

CARACTERISTICAS DE LOS CABLES COAXILES (Cont.)

Grupo de impedancia	50	50	50	50	75	75	75
Nº de lista BICC	—	—	—	—	—	—	—
Nº servicio BS2316-UNIRADIO (UR)	RG58U	RG8U	RG17U	Foamed RG8AU	RG59U	RG11U	RG11
Impedancia característica (Ω)	53.3	52	52	50	73	75	75
Capacidad nominal (pF/ft)	—	29.5	—	—	—	—	20.5
(pF/m)	—	97	—	—	—	—	67
Razón de velocidad nominal	0.659	0.659	0.659	0.75	0.659	0.659	0.666
Atenuación nominal en (dB/100ft/MHz) (dB/30m/MHz) MHz 144	6	2.5	1	2	4.2	2.8	Similar
220	7	3.5	1.3	2.75	5	3.7	←
420	15	5	2.3	3.9	8	5	RG11U
Disipación máxima en (Watts/en aire/MHz) MHZ	Watts	Watts	Watts	Watts	Watts	Watts	
144	175	800	2300	800	250	800	—
220	135	650	1900	650	180	650	
420	90	400	1200	400	125	400	340
Tensión máxima de r.f. (kV pico)	—	—	—	—	—		5
Diámetro exterior cable (pulg.)	0.195	0.405	0.87	0.405	0.242	0.405	0.405
(mm)	5.0	10.3	22.1	10.3	6.1	10.3	10.3
Sirve para radioaficionados VHF/UHF	VHF distancias cortas	VHF y UHF distancias cortas	VHF y UHF	VHF	VHF distancias cortas	VHF	VHF

CABLES DE LA ESPECIFICACION MILITAR DE LOS ESTADOS UNIDOS MIL-C-17D CON NUMEROS DE LISTA BICC CORRESPONDIENTES Y EQUIVALENTES APROXIMADOS BS 23 16

Referencia MIL-C-17D	*Nº lista BICC*	*Equivalente aproximado BS 23 16*		*Impedancia (Ω)*
		Nº UR	*Nº UR*	
RG 6A/U	T3351	—	—	75
RG 11A/U	T3373	UR57	URM57	75
RG 34B/U	T3339	—	—	75
RG 35B/U	T3340	—	—	75
RG 58C/U	T3352	UR76	URM76	50
RG 59B/U	T3353	UR90	URM90	75
RG 113A/U	T3393	UR78	—	95
RG 164/U	T3332	UR77	URM77	75
RG 177/U	T3343	—	—	50
RG 212/U	T3297	—	—	50
RG 213/U	T3382	UR67	URM67	50
RG 214/U	T3298	UR112	URM112	50
RG 215/U	T3381	—	—	50
RG 216/U	T3396	UR60	URM60	75
RG 218/U	T3345	UR74	URM74	50
RG 219/U	T3346	UR75	—	50
RG 220/U	T3347	—	—	50
RG 221/U	T3348	—	—	50
RG 223/U	T3354	UR115	URM115	50
RG 224/U	T3349	—	—	50

Cortesía de BICC Ltd.

Cables coaxiles, conectores y conexiones

Dado que los cables coaxiles se emplean mucho más que los demás tipos de líneas de transmisión en VHF y UHF, este libro quedaría cojo si no diésemos en él detalles de los coaxiles más conocidos, así como unas palabras acerca de las conexiones de los cables. Las listas anteriores proporcionan los datos correspondientes a la impedancia característica, cifras BICC y de Servicio, así como las pérdidas en dB por 100 ft/MHz (30 m/MHz).

Conectores y conexiones coaxiles

El más utilizado es el PL295, del que hay un tipo para cables de diámetro pequeño y otro para diámetro grande. El de diámetro pequeño es para los cables que no exceden los 6 mm. Siempre resulta importante el que, tanto éstos como cualesquiera otros tipos de conectores utilizados, estén bien conectados, pues de lo contrario se producirían pérdidas. La forma correcta de conectar los conectores PL295 con adaptadores de diámetro o sin ellos se indican en las figs 4.11 y 4.12, cuyos textos relevan de más explicaciones.

Donde se unen el extremo final del cable y la antena resulta vital proveer alguna especie de protección para que no llegue humedad a la conexión ni entre en el cable. Téngase en cuenta que si entra agua en el cable coaxil quedará destruido, tanto por corrosión del conductor interior y del exterior como por el simple efecto de su presencia. La aplicación de grasa de silicona en el extremo expuesto del cable es asimismo una precaución extra contra la entrada de humedad. Se evitarán dobleces bruscos en ángulo cerrado cuando se instale el cable coaxil y se tendrá cuidado en su manejo para que no se rompa ni se quiebre el conductor macizo interior. No usen grapas metálicas para sujetar el cable a paredes, techos, etc., pero tampoco debe quedar el cable colgando, sino que su peso ha de ir repartido en bridas de sujeción bien aislantes, de nilón u otro plástico idóneo. Tampoco es prudente cortar un cable que resulte un metro o así más largo de lo necesario: siempre puede suceder que más adelante haya que cambiar la antena de emplazamiento o subirla un poco más y, mientras tanto, un poco de cable de exceso no supondrá mucho para las pérdidas totales.

Cuando haya más de una antena en el mástil, como suele suceder muy a menudo, los cables de cada una no deberán ir muy juntos, sobre todo si las antenas son de la misma frecuencia. Por ejemplo, es práctica habitual tener una antena yagi y otra omnidireccional juntas. La interacción entre sus cables puede ocasionar distorsión del gráfico de radiación de una de ellas o de ambas.

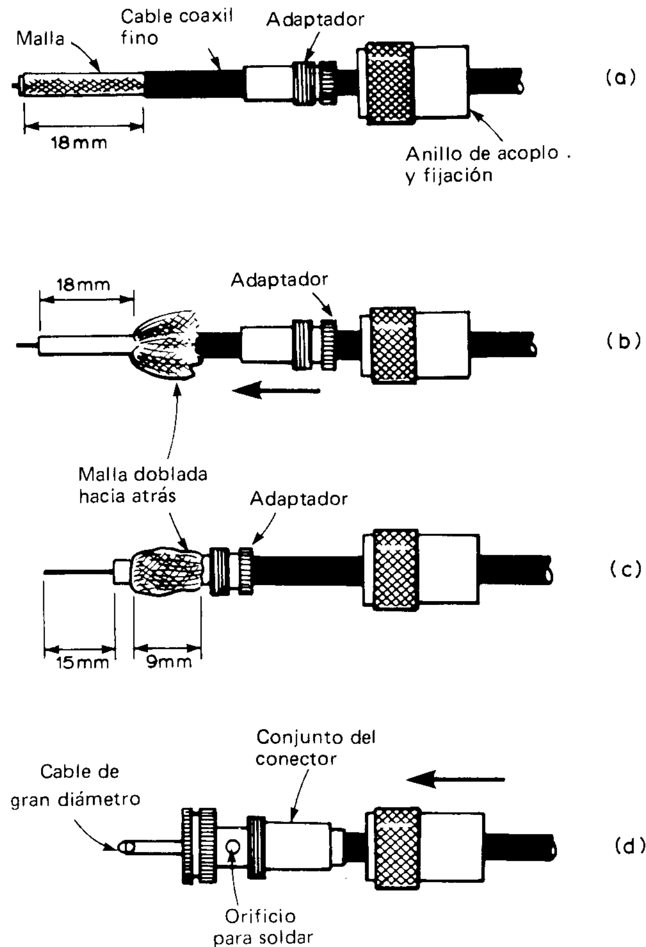


Fig. 4.11.– (a) Cable pelado y adaptador y anillo de acoplo colocados. (b) Forro doblado hacia atrás. (c) Adaptador puesto debajo de la malla del forro. (d) Conjunto del conector ya colocado y listo para soldarlo donde se indica.

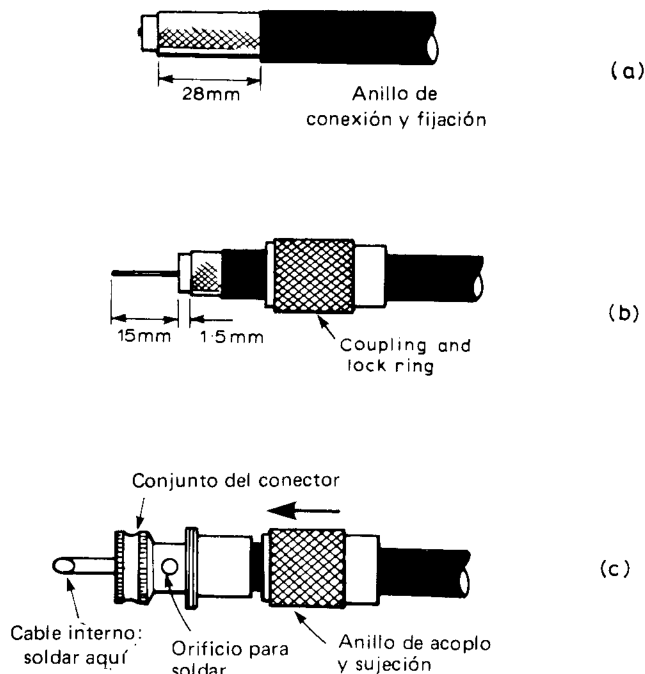


Fig. 4.12.– (a) Cable pelado y listo para la operación (b). (b) Conductor interior preparado y anillo de sujeción puesto. (c) Conjunto del conector ya puesto y soldado como se indica.

Rotores para antenas

Se trata de un elemento que lo mejor que se puede hacer es comprarlo, pero que siempre habrá de tenerse en cuenta el peso que ha de mover. Algunos radioaficionados se hacen sus propios rotores, pero eso implica una buena cantidad de trabajo mecánico de precisión. Si hay que mover una o más antenas yagi, por ejemplo para las bandas de VHF y UHF, se necesitará un rotor

por el estilo del representado en la fig. 4.13. Hay versiones menores, capaces de desplazar yagis pequeñas de VHF o UHF, pero conviene tener en cuenta la posibilidad de que en un futuro más o menos cercano necesitemos ampliar nuestra instalación.

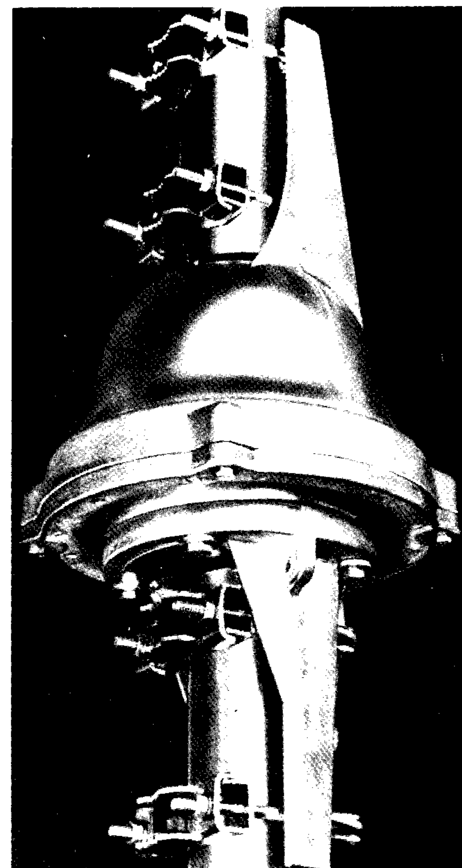


Fig. 4.13.- Rotor típico de gran potencia para antena (cortesía de Aerialite Limited).

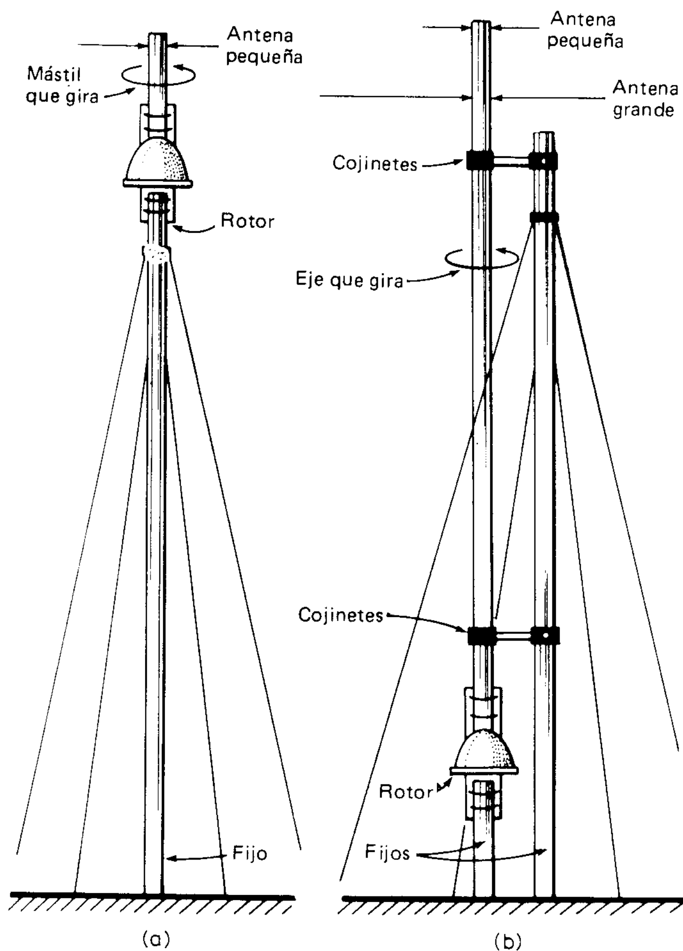


Fig. 4.14.– Modos de empleo de un rotor. (a) En la cúspide de un mástil, con elemento corto, apropiado para antenas pequeñas. (b) En la parte inferior de un mástil largo, con ejes y cojinetes, cuando se trata de hacer girar antenas de varios elementos, grandes y pequeñas.

Los rotores comerciales suelen suministrarse con una caja de control que permite detenerlos en un punto determinado o van provistos de rotación continua en los 360° con parada automática en 0° ó 360°, según el sentido de giro. Algunos (como el de la foto de la fig. 4.13) van dispuestos de modo que la sección inferior encaja y se sujeta en el mástil, en su extremo, tal como se indica en la fig. 4.14 *(a)*, con la sección superior provista de un trozos de mástil lo suficientemente grande para permitir el montaje de una o dos antenas yagis de peso y dimensiones relativamente pequeños, como las empleadas en VHF y UHF. Esta sección de mástil habrá de ser de material aislante, sobre todo si se ha de trabajar con polarización vertical. En ese caso, un mástil metálico distorsionaría considerablemente el gráfico de radiación, a la vez que reduciría el rendimiento de la antena.

Si hay que mover antenas mayores, un método mejor podría ser el de la fig. 4,14 *(b)*, con el que se eliminan las tensiones mecánicas impuestas al rotor.

Capítulo 5

RENDIMIENTO DE LAS ANTENAS

Medir el rendimiento de una antena es ardua tarea, aunque se disponga de equipos muy perfeccionados, como consecuencia de la gran cantidad de factores variables que intervienen, la mayoría de los cuales no siempre se pueden tener en cuenta de un modo razonable. La medida de la ganancia de la antena, por ejemplo, sólo puede conseguirse con cierto grado de seguridad si se lleva a efecto en condiciones ambientales ideales y con una adaptación virtualmente perfecta entre ella y la línea de transmisión, así como entre la antena de referencia y esa misma línea, que habrá de utilizarse de manera que las pérdidas en ella sean iguales en los dos casos. Asimismo, cuando una antena sea sustituida por otra, la posición habrá de ser la misma en ambas ocasiones. Como es lógico, las condiciones ambientales ideales exigen espacio libre, para que las ondas puedan recorrer la distancia existente entre la antena que se prueba y la de referencia sin influencia extraña de ninguna clase, bien sea por reflexiones en el suelo o por otras debidas a objetos conductores cercanos.

Cuando se trate de antenas de la región de las r.f., o sea, por debajo de los 50 MHz, la medida directa del rendimiento, trátese de la que se trate, resultará prácticamente imposible, excepto tal vez la de la intensidad de campo en el terreno circundante. Tal es la causa de que los proyectistas de antenas recurran por lo general a modelos de VHF o UHF, ya que con ellos se pueden conseguir con mayor facilidad aproximaciones a las condiciones del "espacio libre".

Todas las antenas se comportan del mismo modo respecto a la frecuencia en la que han de funcionar. Por ejemplo, un dipolo de media onda calculado para funcionar en 7 MHz habrá de tener el mismo gráfico octoide de radiación que otro diseñado para trabajar en 70 ó 700 MHz. Esta idea de proporcionalidad es aprovechada por los proyectistas de barcos y aviones, que reducen la versión de tamaño natural de ellos para comprobar su comportamiento en tanques con olas o túneles de viento, según el caso. Las antenas por su parte tienen a la vez la propiedad "recíproca" de que su comportamiento en recepción es el mismo que en emisión, lo que permite utilizarlas en recepción a la hora de hacer pruebas de ganancia y directividad.

Las condiciones del espacio libre son mucho más fáciles de simular cuando se trabaja en frecuencias muy altas, con modelos de antenas hechos a escala, según la cantidad de longitudes de onda entre tierra y los demás objetos se hace mayor y, por consiguiente, se necesita menos espacio en longitudes de onda en el que trabajar. Siempre que la antena de VHF o UHF esté situada a una cantidad razonable de longitudes de onda por encima del suelo, podrá considerarse en el espacio libre.

Del mismo modo, la distancia entre la antena del equipo de prueba y la que se está probrando tiene que ser también un número considerable de longitudes de onda si se quiere conseguir un gráfico polar de una exactitud razonable Por lo común, la antena que se prueba se hace funcionar en recepción, lo que hace que se pueda conectar al equipo de medida. De todos modos, antes de empezar a pensar siquiera en función de medidas de ganancia y de gráficos polares es esencial poder comprobar que la potencia llega íntegra del transmisor a la antena y que, del mismo modo, la señal recibida se transfiere íntegra de ella al receptor.

Pérdidas en el cable y ROE

La condición primera y esencial para la medida del rendimiento de una antena es asegurarse de que la ROE es lo más baja posible, que al mismo tiempo constituirá un signo bastante seguro de que la salida del transmisor, el cable de alimentación y la antena están bien adaptados entre sí. Pero también hay problemas potenciales distintos del de la adaptación entre el cable y la antena, y

uno de ellos puede ser el de la desadaptación entre la salida del transmisor y el cable. Conviene siempre comprobar con ayuda de un medidor de potencia y una carga ficticia, que lógicamente habrá de tener la misma "resistencia" que impedancia de salida el transmisor. Los cables usados para conectar los dos elementos habrán de ser de la misma impedancia. Los cables coaxiles de calidad dudosa o desconocida, así como los que hayan estado sometidos a humedad, podrán traducirse en una desadaptación o unas pérdidas elevadas. Por eso es una falsa economía usar cable barato, y cuando exista alguna duda convendrá efectuar una prueba para determinar la longitud que ha de utilizarse, conectando un extremo al transmisor y el otro a una carga ficticia.

Con un medidor de potencia conectado en serie con la carga en el extremo más alejado del cable se puede determinar si en la carga se desarrolla un nivel de potencia lo suficientemente próximo al del transmisor. Las únicas pérdidas que ha de haber serán las debidas al cable, que deben ser las normales. Los amplificadores de potencia de r.f. que haya en el circuito, aunque no se usen, pueden introducir una ROE superior a la prevista, lo mismo que los conmutadores coaxiles, por lo que deberán eliminarse del circuito al comprobar por vez primera la ROE de una nueva antena.

Los valores aceptable de ROE son siempre tema de controversia y las lecturas muy bajas (p. ej., muy cercanas al valor 1 a 1 en toda la banda) deberán considerarse con desconfianza, sobre todo si el alimentador, aunque sea coaxil, es muy largo. Las pérdidas propias del cable, que pueden ser altas (según su calidad), absorberán potencia de una antena mal adaptada, lo que tendrá como consecuencia un valor bajo de ROE en el transmisor. De modo ideal, la ROE deberá medirse en los dos extremos del cable, especialmente cuando se trate de establecer el grado de adaptación con la antena.

Empleo de medidores de potencia y de ROE

Los medidores de ROE y de potencia de r.f. realmente exactos y apropiados para VHF son muy caros. Los incluidos en los transmisores no deben aceptarse como precisos, ni tampoco los de pequeño tamaño, hechos en el Japón, que son tan populares. De ser posible, esos instrumentos deberán comprobarse con otro de

reconocida exactitud, aunque se podrá obtener una idea aproximada con una carga ficticia bien hecha, similar a la ilustrada en la fig. 5.1 *(a)*, conectada como se indica en *(b)*. La carga ficticia consta de 10 ó 12 resistencias de un valor tal que cuando se conectan en paralelo, como se representa en la figura, proporcionan el valor adecuado de la carga con una aproximación de ± 1 Ω. Las resistencias habrán de ser de una disipación de 2 W para una potencia total no superior a 20 W, y de carbón, con el fin de reducir al mínimo los efectos inductivos. La conexión entre el medidor de ROE y la carga será lo más corta posible. Si la carga se hace tal como se indica, la ROE no será mayor de 1 a 1,1. Debe comprobarse, si se puede, con un medidor de potencia de precisión reconocida.

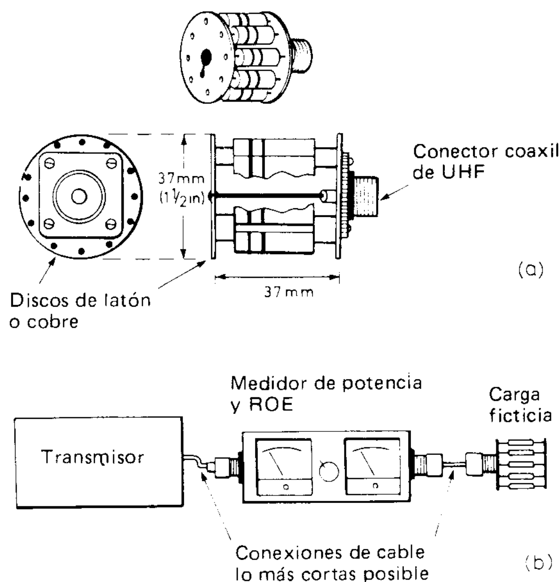


Fig. 5.1.– Construcción de una carga ficticia de 50 Ω (véase en el texto la referencia a los valores de las resistencias).

Comprobación de una antena nueva

Una antena recién hecha deberá probarse con un cable corto, para obviar la posibilidad de indicaciones falsas, que podrían deberse a un cable de alimentación excesivamente largo. Conviene realizar una prueba preliminar en recepción, para asegurarse de que la antena funciona bien por lo menos antes de aplicarle potencia, pero incluso después es preferible hacer una prueba inicial con poca potencia, aunque sólo sea para evitar posibles daños a las etapas finales de transistor en el caso de alguna conexión en corto o en circuito abierto.

El medidor de ROE o de potencia se conectará en la línea, entre el transmisor y el cable alimentador, si dicho medidor no está incorporado en el propio transmisor. Si queda indicada potencia emitida con el nivel apropiado o una ROE razonablemente baja, podrá aplicarse una potencia mayor, para hacer la prueba final, aunque haga falta un poco de sintonía en la antena con baja potencia.

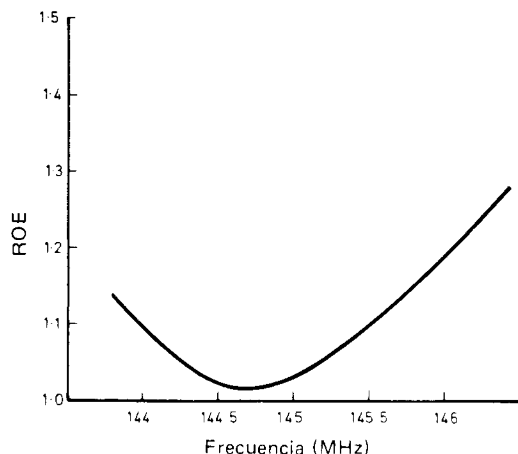


Fig. 5.2. - Curva típica de respuesta de ROE con cable de alimentación de muy bajas pérdidas.

Los amplificadores externos de alta potencia no deberán conectarse nunca en el circuito y activarse con una antena determinada, antes de haber establecido una lectura de ROE lo suficientemente baja. Si la antena es bastante resonante en el centro de la banda, una prueba en toda la banda de 2 m deberá indicar una ROE, en función de la frecuencia, que será muy aproximadamente como se indica en la fig. 5.2.

Siempre será un poco mayor, ya que la adaptación perfecta pocas veces se consigue. Pero deberá existir la subida adecuada a cada lado del centro de la banda. De todos modos, los resultados dependerán mucho de las pérdidas en el cable, porque, como ya se ha dicho, un cable muy largo o con grandes pérdidas aunque sea corto se traducirá en una curva muy plana y casi con toda seguridad en lecturas de ROE muy bajas.

No suele ser sabido que las lecturas de ROE obtenidas, incluso con un medidor exacto, pueden no ser ciertas y que el valor real será por lo general mayor de lo indicado en las lecturas. Eso se debe a las pérdidas del cable, y en ocasiones uno de éstos de gran factor de pérdidas puede producir una baja lectura de ROE, que lógicamente parece buena, aunque pueda haber una gran desadaptación en el extremo de antena. Con grandes pérdidas en el cable, la potencia reflejada debida a la desadaptación de la antena quedará más absorbida durante su trayecto de retorno hasta el final del cable y, por consiguiente, la ROE puede aparece con un valor bajo. El gráfico de la fig. 5.3 da una idea de las correcciones que han de hacerse, de acuerdo con las pérdidas del cable. Ya se ha insistido antes en que un cable viejo o de calidad inferior puede presentar pérdidas elevadas. La vida útil de un cable coaxil es de tres a siete años, según las condiciones atmosféricas del lugar en que esté instalado. Transcurrido este tiempo, el factor de pérdidas puede incrementarse en varios decibelios.

Comprobación sencilla de la potencia

Uno de los dispositivos más sencillos para comprobar la potencia en los elementos de una antena es un tubo fluorescentes pequeño, del tipo usado para iluminar espacios pequeños tales como armarios y cabinas. Suelen ser de 250 mm de largo y de una potencia de 6 W. Tocando con uno de estos tubos en un elemento de

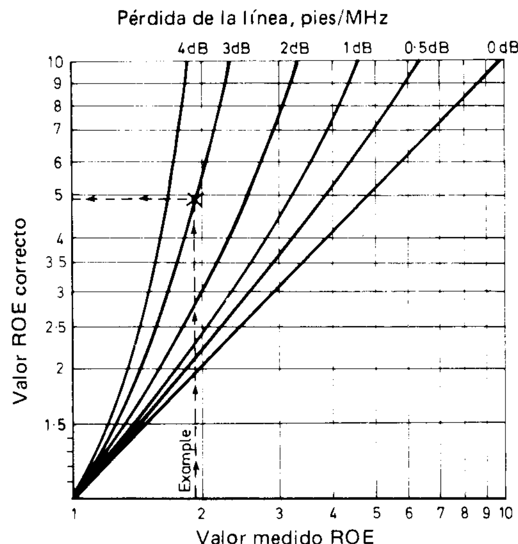


Fig. 5.3.– Valores de ROE corregidos y medidos teniendo en cuenta las pérdidas en la línea. La línea de trazos corresponde a un ejemplo.

antena activado, en un punto de tensión, hará que se ilumine prácticamente con todo su brillo, utilizando una potencia mínima de 10 W en el transmisor. A veces hay que calentar un poco estos tubos antes de usarlos, para que se ceben bien, lo que se conseguirá frotándolos vigorosamente con un paño seco.

Otro dispositivo útil para este menester es un "buscador" de r.f., que consta de un transistor pnp sin polarizar (BC 108 o similar) con un LED en serie con su colector. El circuito es muy sencillo, como se ve en la fig. 5.4, y puede alojarse perfectamente con su batería en una cajita de poco tamaño. La antena de sonda puede ser un trozo de hilo de cobre de unos 100 mm de largo, con el que se explora la tensión máxima de los elementos activos y pasivos de la antena. Dicha exploración deberá llevarse a cabo con la sonda muy cerca de los elementos, pero sin tocarlos.

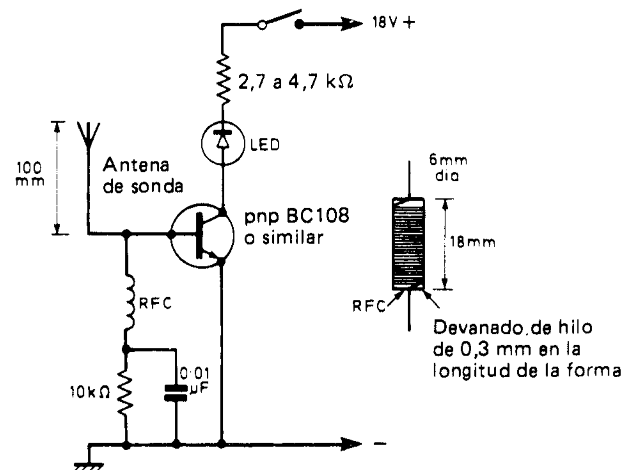


Fig. 5.4.– Buscador de r.f. sencillo (véase en el texto su construcción y empleo.

Efectos de la ROE

La pérdida de potencia en una línea de transmisión es lo más baja posible cuando queda terminada por una resistencia del mismo valor que su impedancia característica, aumentando al crecer la relación de ondas estacionarias (ROE) de tensión o de corriente. Esto se debe a que los valores eficaces de la corriente y la tensión se hacen mayores a medida que se incrementa la relación de ondas estacionarias. Al crecer la corriente eficaz lo hace también la pérdida resistiva en los conductores de la línea y, por su parte, el aumento de la tensión eficaz se traduce en otro de las pérdidas en el dieléctrico de la línea. La mayor pérdida causada por una ROE superior a 1 ó 2 puede no ser tran grave como muchos creen. Si la ROE no es mayor de 2, por ejemplo, la pérdida adicional puede no llegar a más de unos 0,5 dB, incluso con líneas de transmisión largas.

En la fig. 5.5 se indica el porcentaje de potencia devuelta (perdida) con varios grados de ROE. Ello no obstante, la pérdida natural de la línea de transmisión ha de tenerse siempre en cuenta al comprobar la ROE, como se indica en la fig. 5.3. Obsérvese que cuando la pérdida de la línea es alta, y suponiendo una adaptación perfecta, la pérdida adicional, en decibelios, causada por una onda estacionaria tiende a ser constante, con independencia de la pérdida propia de la línea. La razón es que la cantidad de potencia reflejada desde la carga se reduce de algún modo, porque, con pérdidas altas en la línea, es poca la potencia que llega en realidad a la carga, ya en principio.

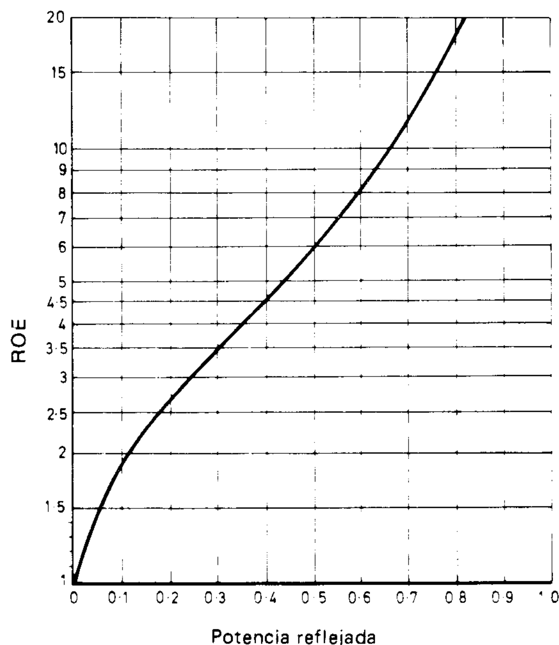


Fig. 5.5.– Potencia reflejada en función de la ROE leída.

A título de ejemplo, si la pérdida de la línea es de 6 dB, a la carga sólo le llegará el 25 % de la potencia aplicada por el transmisor. Si la ROE debida a la desadaptación de la carga fuese de 4 a 1, se reflejaría el 36 % de la potencia. Como a la carga sólo le ha llegado el 25 % de la potencia original, la potencia real reflejada será de 0,25 x 0,36 = 0,09, o sea, el 9 % . Por otra parte, esta potencia de retorno queda atenuada además (por la línea) en 6 dB, lo que hace que a la salida del transmisor sólo le llegue 0,09 x 0,25 = 0,025, que es un poco más del 2 % . La consecuencia sería una lectura baja de ROE en el extremo del transmisor: en este caso, de 1,35 a 1 aproximadamente.

Por lo contrario, con líneas de muy bajas pérdidas una ROE muy alta puede incrementar la pérdida de potencia en una gran proporción, aunque la pérdida total siga siendo bastante pequeña en comparación con la que le llega a la carga. Con una ROE de 10 en una línea que tenga sólo una pérdida de 3 dB, la pérdida adicional sería de 1 dB aproximadamente.

Pérdida en el cable

Puede comprobarse conforme se ha dicho ya midiendo la potencia en una carga ficticia colocada al final del cable y comparándola con la medida aplicada a la línea por el transmisor. Si suponemos 10 W en el cable y que aparecen 9 W en la carga, la pérdida en decibelios es de $10 \log_{10} P_2/P_1$, siendo P_1 la potencia del transmisor y P_2 la aplicada a la carga, lo que nos da $10 \log_{10} 9/10 = 0{,}457$ dB, o sea, menos de 0,5 dB, que puede considerarse despreciable.

Del mismo modo, con un cable de longitud dada y una pérdida conocida de 3 dB, por ejemplo, la pérdida de potencia en la antena llegaría a la mitad de la aplicada en el extremo del transmisor. Podemos calcular pues esa pérdida sabiendo que de los 10 W originalmente aplicados al cable sólo llegan 5 a la antena. Por consiguiente, $10 \log_{10} 5/10 =$ 3 dB.

Como las pérdidas en los cables, así como las debidas a desadaptaciones y demás, son bajas expresadas en decibelios, la tabla 5.1 (pérdidas de potencia y ganancias, en decibelios) puede resultar útil. Para usarla basta con conocer la razón de las potencias de que se trate. Naturalmente, puede usarse la misma tabla para de

Tabla 5-1.— PERDIDA O GANANCIA EN DECIBELIOS PARTIENDO DE LA RAZON DE DOS POTENCIAS

Razón de potencias (−dB)	*dB*	*Razón de potencias (+ dB)*
1.000	0	1.000
0.977	0.1	1.023
0.995	0.2	1.047
0.933	0.3	1.072
0.912	0.4	1.096
0.891	0.5	1.122
0.871	0.6	1.148
0.831	0.8	1.202
0.794	1.0	1.259
0.707	1.5	1.413
0.631	2.0	1.585
0.562	2.5	1.778
0.501	3.0	1.995
0.398	4	2.512
0.316	5	3.162
0.251	6	3.981
0.199	7	5.012
0.158	8	6.310
0.125	9	7.943
0.100	10	10.000
0.079	11	12.59
0.063	12	15.58
0.050	13	19.95
0.039	14	25.12
0.031	15	31.62
0.025	16	39.81
0.019	17	50.12
0.015	18	63.10
0.012	19	79.43
0.010	20	100.00

p. ej., con una razón de potencias de valor $P_2/P_1 = 10/5 = 2$. En + dB la cifra más cercana es 1,995, que equivale a 3 dB.

terminar la ganancia de potencia relativa entre una antena y otra. Por ejemplo, suponiendo que un dipolo radie en realidad 10 W y se sustituya por una antena yagi de una ganancia de 6 dB, ¿cuál sería la potencia eficaz radiada por esta última? La razón de potencias para 6 dB es de 3,981, o sea 4 con mucha aproximación, por lo que la potencia buscada sería de 10 x 4 = 40 W.

La pérdida de potencia en los cables coaxiles puede estimarse mediante el gráfico de la fig. 5.6, midiendo la ROE con un cortocircuito al final del cable. El ejemplo que se da en línea de trazos

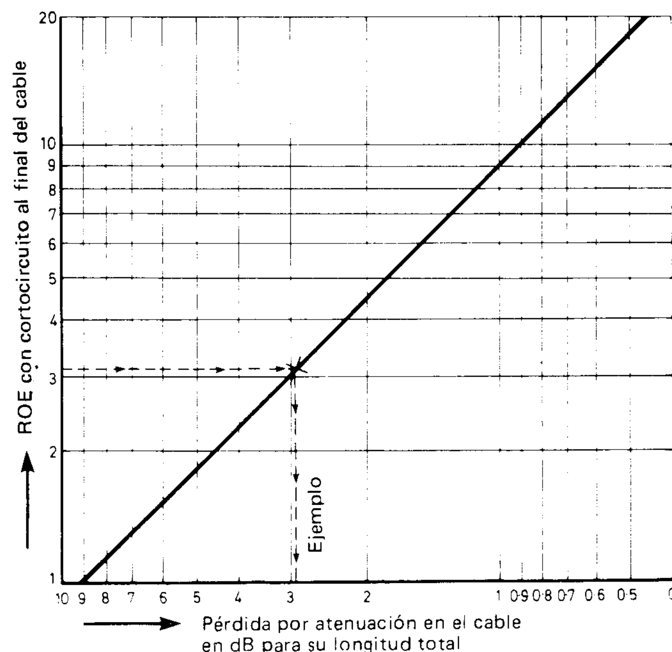


Fig. 5.6.— Modo de hallar la pérdida por atenuación en el cable, en decibelios, para una longitud dada, tomando la ROE con cortocircuito en el final del cable. Ejemplo: ROE = 3. Pérdida en el cable = 3 dB, como en la línea de trazos (véanse en el texto las aplicaciones de esta prueba).

demuestra que con una ROE de 3 a 1 las pérdidas serán de 3 dB, cualquiera que sea la longitud de éste.

Esta prueba sólo debe hacerse si el cable es relativamente largo, ya que una ROE muy alta podría traducirse en daños a los transistores de las etapas finales, aunque la mayoría de los aparatos modernos transmisores-receptores para VHF y UHF llevan incorporado un sistema de protección contra sobrecargas, que inmediatamente reduciría o interrumpiría la potencia al aparecer una ROE alta.

Colocación de la antena

La propagación de las ondas en VHF y UHF es óptica en casi su totalidad, como ya se dijo en el capítulo 1, aunque las condiciones atmosféricas y otras permiten de vez en cuando enlaces a mayores distancias. La altura de la antena, tanto en el extremo emisor como en el receptor, es por eso el factor más importante para conseguir enlaces a gran distancia, siguiéndole en importancia unos alrededores despejados.

De modo ideal, las antenas de VHF y UHF deben ir tan altas que los edificios, árboles, etc, que haya en sus proximidades no interrumpan la línea de radiación, que normalmente es paralela a tierra. La atenuación debida a paredes de ladrillo, edificios de estructura metálica y árboles es muy alta y llega a valores que muy pocos suponen. Las pruebas efectuadas para determinar los efectos de los edificios han demostrado que los campos de radiación tienen un valor medio de unos 25 dB por debajo de lo esperado en un trayecto despejado, en la gama de frecuencias de 40 a 450 MHz.

También se han calculado valores de las pérdidas que son de esperar en transmisiones a través de árboles cuando la antena está más baja que sus copas, aunque en este caso la pérdida depende de la polarización. Alrededor de los 30 MHz puede ser ésta de 3 dB con polarización vertical y despreciable con la horizontal, pero sube ya a 10 dB por encima de los 100 MHz en el primer caso y llega a los 3 dB en el segundo. Las paredes de ladrillo ofrecen una atenuación aproximada de 6 dB o más en VHF y UHF, aunque variará según la sequedad. De todos modos, eso significa

que la atenución de la radiación en el caso de antenas interiores puede llegar a ser relativamente alta, sobre todo cuando las paredes y el tejado están húmedos. También se han llevado a efecto investigaciones acerca de la influencia del terreno y las edificaciones sobre la polarización de las señales recibidas.

La difracción y la reflexión de las ondas en el suelo, los edificios y otros objetos conductores pueden hacer que se tuerza la polarización. Algunas pruebas llevadas a cabo por el autor revelaron que las señales polarizadas verticalmente, procedentes de estaciones situadas a distancias de 45 a 60 km o más pueden llegar a orientarse horizontalmente hasta tal punto que se podía conseguir una mejora de la señal de 3 a 6 dB inclinando la antena receptora a una posición intermedia entre la vertical y la horizontal.

Otros factores que pueden influir grandemente en la propagación son lógicamente la fase de las señales directa y reflejada que llegan a la antena, las cuales pueden variar mucho con la frecuencia, como se ilustra en la fig. 1.5. Los efectos combinados de difracción, atenuación y fase resultan más notables con señales procedentes de transmisores móviles y se traducen en una "titilación" característica, en especial en las zonas de gran densidad de construcciones. De aquí, la importancia de disponer de una antena eficaz y bien colocada en el vehículo (véase el capítulo 2: Funcionamiento móvil y portátil).

Ganancia de la antena

La ganancia de una antena es el parámetro más difícil de medir, a menos que se disponga de locales y equipos especiales. Como se dijo ya al principio de este capítulo, hay que utilizar algo que se parezca a las condiciones del espacio libre si se quiere que las medidas tengan algún significado. El equipo de medida deberá ser asimismo muy preciso, por lo que los medidores de S clásicos, equipados con marcaciones muy dudosas en dB son prácticamente inútiles, excepto para el caso de que se trate de determinar si al cambiar una antena por otra se tiene aumento o disminución del nivel de señal obtenido.

Otra restricción es que la "iluminación" de la antena que actúa de fuente de energía ha de ser una onda plana sobre la zona de

abertura o captura presentada por la que se trata de medir y probar. Por eso la antena radiante y la probada han de estar separadas un buen número de longitudes de onda.

Como las condiciones del espacio libre no se pueden simular, los alrededores pueden afectar a la media por reflexión en el suelo y otros obstáculos conductores situados en las proximidades de la fuente emisora y la probada.

A menos que se puedan resolver satisfactoriamente los problemas mencionados, resultará baldío el esfuerzo realizado intentando medir ganancia con antenas montadas en lugares normales, con alrededores perturbadores. Y lo dicho puede hacerse extensivo al trazado de los gráficos de radiación, porque el gráfico real de una antena puede quedar muy deformado por la reflexión en otros conductores (sobre todo si éstos resuenan en la frecuencia de funcionamiento), así como por la reflexión y la refracción de las señales en edificios grandes, etc. Para estas tareas el equipo de medida tiene que ser muy exacto.

Medidas con antenas a escala

Los problemas relacionados con la medida del rendimiento de una antena ya han quedado puestos de relieve en su momento. Si alguien emprende esta clase de trabajo con vistas a conseguir unos resultados útiles y de precisión conveniente, no sólo necesitará equipo especial, sino que al mismo tiempo habrá de buscarse unos alrededores especiales, condición ésta que es la más difícil de cumplir, sobre todo si las pruebas tienen que realizarse con antenas de tamaño natural, aunque se trate de las destinadas a frecuencias de 145 MHz.

El autor lleva muchos años implicado en la determinación del comportamiento de antenas de radioaficionado y de otras bandas de ondas, desde 1,8 hasta 430 MHz y, lo mismo que otros muchos profesionales, utiliza modelos a escala de antenas que funcionan en la región de la UHF e incluso de las ondas centimétricas. Para los fines perseguidos cuando se trate de antenas de radioaficionado, un sistema de medida del comportamiento de una antena a escala no resulta nada difícil, aunque si se quiere obtener una información útil el equipo y los procedimientos han de ser tales que

dejen muy poco margen de duda. Al final del libro se encontrarán dos sistemas usados por el autor, cada uno de los cuales contiene detalles suficientes para una instalación apropiada destinada a obtener gráficos de radiación.

Sistema de prueba de un modelo de antena

El equipo usado actualmente por el autor funciona en una banda de frecuencias que va de 650 a 1200 MHz e incluye un transmisor separado de 300 MHz. empleado únicamente para las pruebas de adaptación de impedancia y puesta en fase. Prácticamente todo el trabajo relacionado con la comprobación de los gráficos de radiación (las antenas son modelos hechos a escala, llevados a esas frecuencias desde otras más bajas) se efectúa con el equipo representado en la fig. 5.7 y un transmisor especial de frecuencia variable (650 a 1200 MHz) que incluye su propia antena de banda ancha y su reflector parabólico.

En estas frecuencias la distancia entre la antena transmisora y la que se comprueba (en recepción), así como sus alturas respectivas sobre el suelo, pueden ser una cantidad bastante considerable de longitudes de onda, aunque la zona en que se realice la prueba sea pequeña en realidad. Lógicamente hay que tener cuidado en eliminar las reflexiones de los obstáculos que haya en las proximidades, de ser posible quitándolos.

El equipo mostrado en la fig. 5.7 consiste en un tubo de rayos catódicos provisto de pantalla de gran persistencia, de 250 mm de diámetro, en la que se presenta de modo continuo la gráfica de radiación, conforme va girando la base de tiempo en sincronismo con la antena que se prueba. La medida de los cambios de amplitud se obtiene convirtiendo la señal variable de la antena probada en un impulso de amplitud variable en el t.r.c. (tubo de rayos catódicos). De todos modos, se ha incluido una previsión para la medida de la ganancia, generalmente con referencia al dipolo, con ayuda de un decibelímetro de lectura lineal (debajo del t.r.c. en la fotografía) que también incluye dispositivos para convertir las señales variables de antena en otra de b.f., también variable (2000 Hz), con lo que los gráficos de radiación registrados en el t.r.c. pueden grabarse a la vez en cinta magnetofónica, de donde se pueden extraer en cualquier momento en que se necesiten.

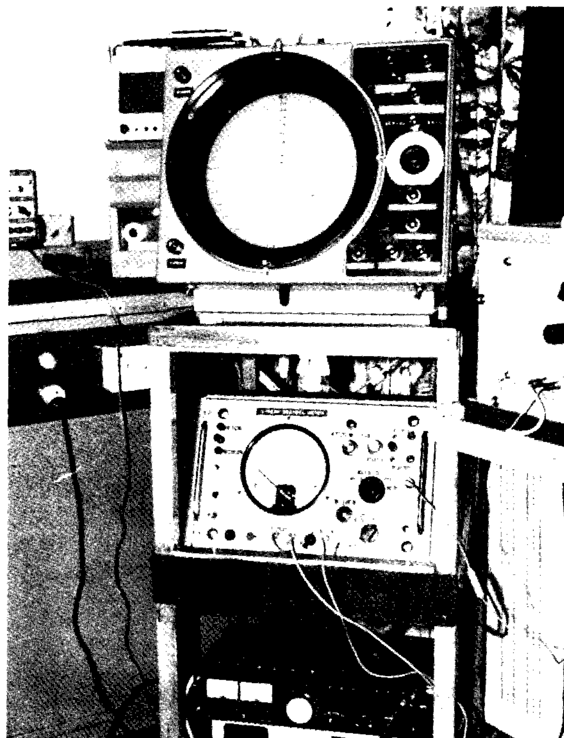


Fig. 5.7.– Indicador de gráfico polar (p.p.i.) y equipo de medida usado por el autor en la determinación del comportamiento de las antenas.

Las marcaciones de calibración en escala lineal o logarítmica de dB y un "puntero" son dispositivos que pueden incluirse en el t.r.c., así como el gráfico de referencia de un dipolo generado electrónicamente, pero muy preciso, o del tipo omnidireccional (círculo completo), los cuales pueden ajustarse a cualquier amplitud, y superponerse al de la antena que se está probando. La pantalla va provista con retículas iluminadas y filtros de varios colores, para fines fotográficos.

El sistema giratorio para la antena a escala está sincronizado con el p.p.i. (pantalla del tubo de rayos catódicos o indicador de posición en el plano) mediante un arrastre de motor Selsyn y ambos giran con una velocidad aproximada de una revolución cada tres segundos (20 r.p.m.). Las antenas que se prueban se acoplan directamente a un circuito detector giratorio, que proporciona las señales continuas por intermedio de anillos rozantes al p.p.i., en su circuito conversor señal/impulso, o al decibelímetro, etc.

La mayoría de las pruebas se realizan en 650 MHz, ya que las antenas resultan relativamente pequeñas y porque se puede conseguir una adaptación razonablemente exacta al detector, lo que es muy importante si se ha de comprobar la ganancia con una

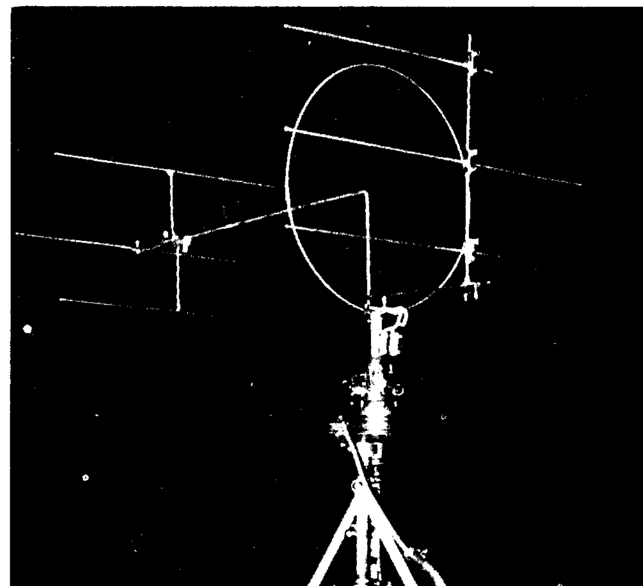


Fig. 5.8.– Prototipo de antena, a escala. El acoplamiento de aro deslizante descrito en el texto puede verse inmediatamente debajo de la antena.

exactitud razonable. La lectura del equipo resulta de una precisión de ± 0,5 dB en amplitud, y de ± 0,3° en la formación del gráfico, así como de ± 1° en angulos asociados a éste. p. ej., al establecer los puntos de –3 dB de la anchura del haz.

Las antenas a escala suelen estar hechas de cobre o latón, con elementos realizados en una escala aproximada, tanto en espesor como en longitud, etc. A veces se usa cable coaxil miniatura para acoplar la antena al detector, aunque normalmente el punto de alimentación de una antena de prueba está acoplado directamente a la entrada del detector. En algunos casos, como es natural, se necesitara una transferencia de adaptación. En la fig. 5.8 se representa una antena experimental a escala. El acoplo de señal, con anillos rozantes, se aprecia exactamente debajo del centro de la antena.

Algunas de las posibilidades del gráfico polar quedan indicadas en las fotos de las figs. 5.9: *(a)* es una silueta típica de mapa, a la

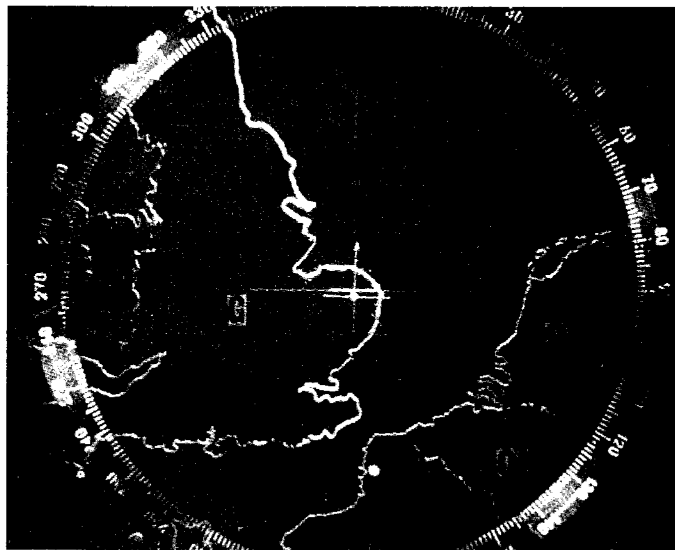


Fig. 5.9. (a) Transparencia con mapa usada en la pantalla del P.P.I. de la fig. 5.7.

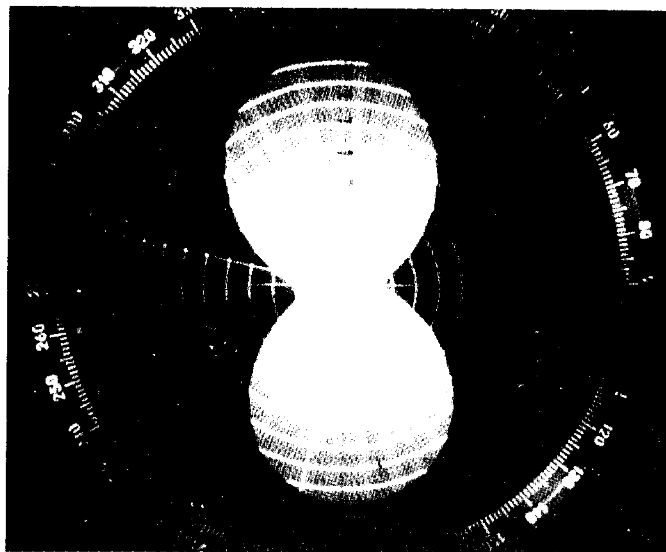


Fig. 5.9.– (b) Gráfico del "dipolo electrónico" y anillos de calibración (véase el texto).

que se le puede superponer el gráfico polar para obtener una idea más visual de la cobertura de una antena dada. Los mapas por el estilo de éste pueden dibujarse a la escala que se quiera. La otra foto *(b)* es el gráfico de un dipolo electrónico, que es una cosinusoide perfecta, generada por luz proyectada a través de dos trozos de polaroid, uno de ellos fijo y el otro giratorio con una velocidad igual a la de la traza de tiempo del p.p.i. La luz llega a una célula fotoeléctrica y, conforme varía la intensidad de la iluminación, la tensión de salida de la célula lo hace también proporcionalmente. Esta fotografía deja ver asimismo los marcadores de calibración, que se han ajustado a una escala lineal de tensión.

Por su parte, en la fig. 5.10 se dan tres ejemplos de gráficos polares obtenidos con antenas a escala. El de *(a)* es de una ZL de 7 elementos especial (descrita en el capítulo 3), en tanto que *(b)*

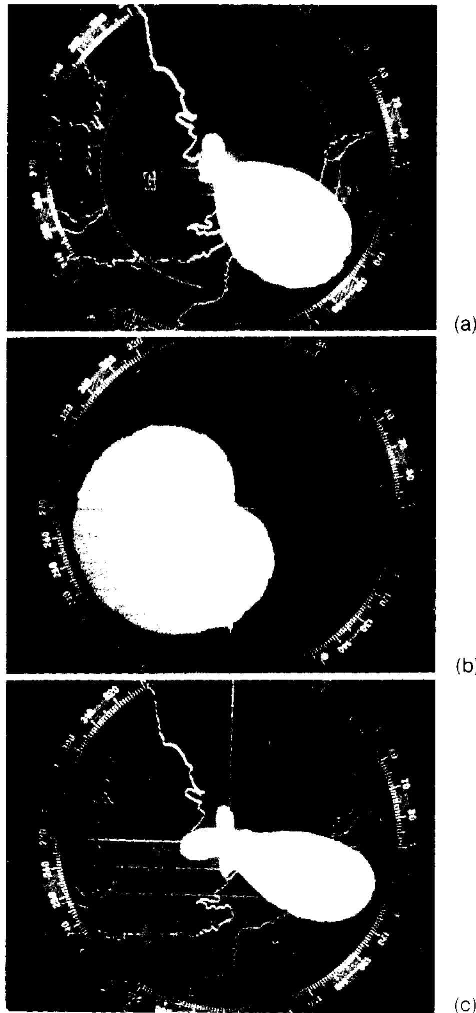


Fig. 5.10 – Varios gráficos polares típicos (a) de una antena ZL especial de 7 elementos, con polarización horizontal. (b) Gráfico cardioide obtenido con la ZL de dos elementos en posición vertical. (c) Gráfico de una yagi típica, que presente lóbulos.

corresponde a una ZL vertical de 2 elementos. El *(c)* es de una yagi típica y en él se aprecian los lóbulos anterior y posterior, así como los laterales, normales en este tipo de antenas. Dos de los grabados llevan una superposición de mapa y el círculo es del marcador, que en este caso indica los puntos de –3 dB de los gráficos.

Proyecto de antenas con modelos a escala

Además de obtener una información respecto al comportamiento de las antenas de diseño conocido, los modelos a escala pueden aprovecharse para proyectar diseños nuevos. Podemos tomar el desarrollo de una antena paso a paso, desde la idea básica hasta la formación final y su comportamiento.

Se trata de conseguir una antena compacta de varios elementos, de una ganancia relativamente alta, partiendo del uso de un radiador de bucle que inicialmente tenga ya algo de ganancia respecto a un gráfico de radiación octoide. La deducción de los radiadores de bucle partiendo de un dipolo plegado ya se indicó en la fig. 3.26, pero hay otro modo de considerar dicho radiador, que consiste en dos dipolos separados una distancia *S* como en la fig. 5.11 *(a)*, pero con sus extremos doblados hasta juntarse, como en *(b)*, formando un cuadro. Dando por supuesto que la separación inicial *(c)* no es inferior a 0,1 λ aprox., puede formarse un bucle de forma rectangular como en *(d)*, con la ventaja entonces de una ganancia pequeña, pero con el mismo gráfico de radiación que el dipolo y una alta impedancia inicial en los puntos de alimentación. En los dos casos el dipolo "libre" queda excitado por el otro, ya que se juntan en los extremos.

En la fig. 5.12 *(a)* se indican los pasos de la formación empezando con el bucle excitado, aislado del larguero. El paso siguiente *(b)* es un reflector de gran área, para conseguir la mayor ganancia frontal posible, que en un prototipo a escala fue de 7 a 8 dB

Esto constituye un eficaz sistema de excitación, al que se puede añadir directores parásitos como en *(c)* para aumentar más aún

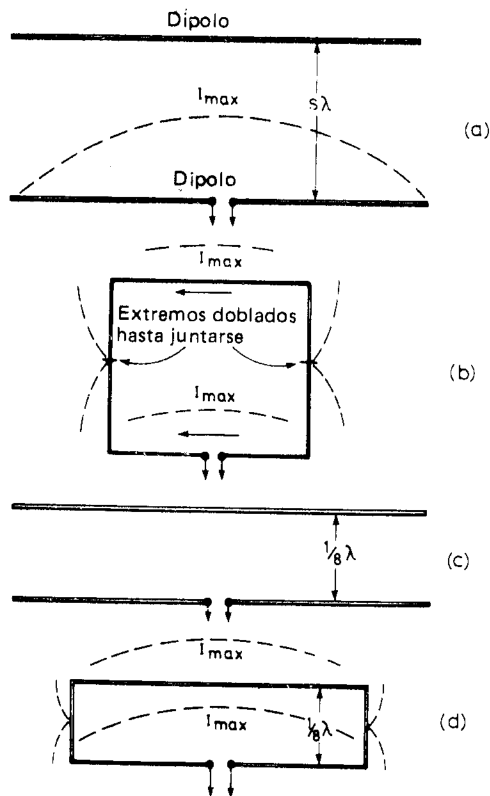


Fig. 5.11.– Formación de dos radiadores de bucle partiendo de un par de dipolos separados (a y c) para formar un bucle cuadrado (b) y rectangular (d).

la ganancia frontal. Las dimensiones para funcionamiento en 145 MHz (u otras bandas) pueden calcularse de las cifras dadas en función de la longitud de onda y utilizando la longitud de onda en el espacio libre. Para 145 MHz, por ejemplo, es de 300/145 = 2,07 m.

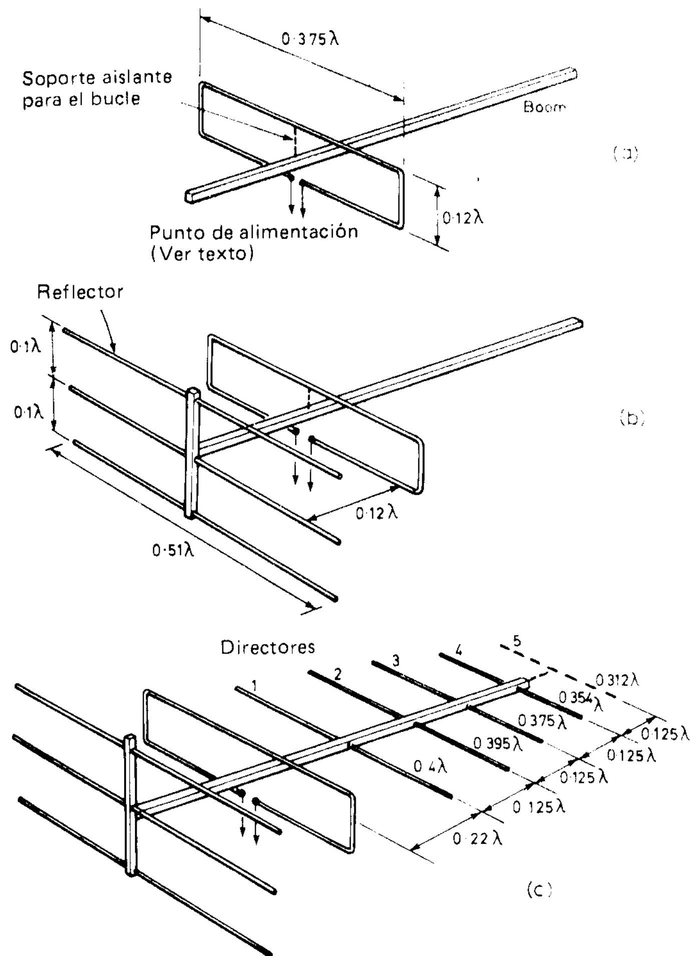


Fig. 5.12.– Dimensiones de una antena de gran ganancia dedu[illegible] del comportamiento y otros datos obtenidos con modelos a es[illegible] de 650 MHz (véanse el texto y los gráficos polares de la fig. 5.13).

Las dimensiones del elemento se encuentra que valen, pues 2,07 veces la fracción de longitud de onda dada. La longitud del bucle rectangular sería pues de 2,07 x 0,375 = 0,77 mm, y así sucesivamente.

La ganancia conseguida con esta antena en funcionamiento sería del orden de 11 dB, pero podemos ver con ayuda del gráfico polar expuesto en el p.p.i. y con los modelos qué gráfico final se obtiene. En la fig. 5.13 *(a)* se da el gráfico del radiador del bucle solo y con referencia a la ganancia final conseguida con la antena completa.

El paso siguiente *(b)* demuestra la eficacia del gran reflector de tres elementos, que proporciona una concentración frontal de la radiación, con un factor de ganancia del orden de 7 a 8 dB. La imagen final de radiación *(c)* se obtuvo con cuatro directores, como en la fig. 5.12 *(c)*, y la ganancia medida fue de 11 dB. Un director adicional (representado con línea de trazos) produjo una ganancia aproximada de 12 dB ± 0,5 dB. La longitud total de esta antena, construida para 145 MHz, sería de 0,75 λ ó 1,55 m. La impedancia de alimentación será del orden de los 50 Ω.

Intensidad de campo

Carece de sentido intentar medir la intensidad de campo de las antenas de VHF, a menos que el equipo de medida esté calibrado en tensión o decibelios, e incluso entonces las lecturas obtenidas pueden verse muy gravemente afectadas por reflexiones. Un medidor sencillo de intensidad de campo sólo es realmente útil para establecer un aumento o una disminución de la radiación, pero hasta para eso necesita ser manejado a varias longitudes de onda de la antena emisora.

La cobertura de una antena, o mejor su eficacia a distancia, queda mejor estimada mediante un uso continuo y comparación con otra. Los informes de señal procedentes de otras estaciones nunca pueden considerarse exactos, ya que los llamados "medidores de S" no tienen una calibración universal, las sensibilidades de los receptores varían mucho de unos a otros y lo mismo les sucede a las antenas usadas por los demás.

Dos estaciones diferentes que estén a la misma distancia, pero separadas sólo poco trecho, puede dar informes contradictorios

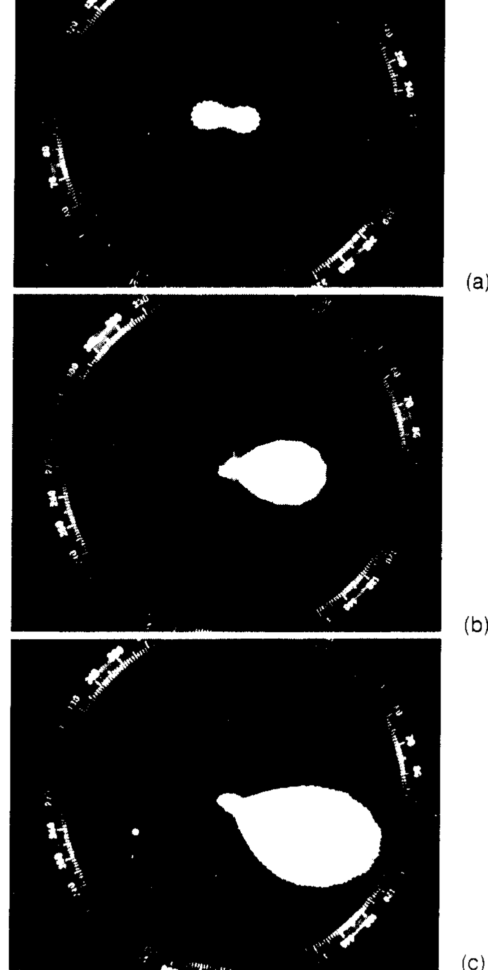


Fig. 5.13.– Cómo pueden aprovecharse los modelos a escala para determinar el comportamiento de antenas en varias etapas de su desarrollo: en este caso, la representada en la fig. 5.12. (a) Gráfico cosinusoidal con un simple radiador de bucle. (b) Con la adición de un reflector de gran superficie. (c) Grafico final y ganancia con los directores. Los gráficos son proporcionales a la ganancia.

respecto al nivel de la señal. Si se trata de establecer si una antena nueva es mejor que la anterior, efectúen las pruebas con una sola estación, usando primero la antena antigua y poniendo después la nueva, colocada exactamente en la misma posición. Sólo así podrán considerarse válidos los resultados.

BIBLIOGRAFIA

ARRL Antenna Book, American Radio Relay League.

Radio, TV and Audio Technical Reference Book, S. W. Amos, Butterworths, 1977.

Radio Wave Propagation VHF and Above, P. A. Mattews, Chapman and Hall.

A Guide to Amateur Radio, Pat Hawker, Newnes-Butterworths, 1979.

Radio Amateurs VHF Manual, American Radio Relay League.

VHF-UHF Manual, G. R. Jessop, R.S.G.B., Londres.

Ham Radio Magazine (EE.UU.), setiembre, 1975.

Beam Antenna Handbook, W. I. Orr, Radio Publications Inc. (EE.UU.).

Cubical Quad Antennas, W. I. Orr, Radio Publications Inc. (EE.UU).

Antennas, J. D. Kraus, McGraw-Hill Book Co. Inc. (EE.UU).

INDICE ALFABETICO

Otros libros de interés publicados por



Transmisión y Telecomunicación

DURANTON.– Radioaficionados. Bandas 27 - 28/30 MHz.
GILL.– Todo sobre antenas de TV. 3ª edición.
HELLBARTH.– Técnica de transistores para los aficionados a la onda corta.
JORDAN y BALMAIN.– Ondas electromagnéticas y sistemas radiantes. 3ª edición.
JUDD.– Radioaficionado. Transmisión y recepción.
McENTEE.– Radiocontrol, telemando y telegobierno. 2ª edición.
NORMAND.– Radioaficionado a la C. B. Banda Ciudadana.
PANNELL.– Emisión y recepción con equipos móviles.
RYDSTROM, ENGELSTOFT y FIALLA.– Construcción de antenas de T.V. 4ª edición.
SMALE y GREEN.– Sistemas de telecomunicación y transmisión.
TECH.– Antenas de fácil montaje. Radio y TV.

Radio

ANGULO.– Electrónica fundamental. *Tomo IV - Teoría:* Generadores de señales. Osciladores. Receptor superheterodino de A.M. *Práctica:* Montaje, ajuste y averías de un receptor de radio. 2ª edición.
BERGTOLD.– Matemáticas para radiotécnicos.
BORQUE.– Esquemas de receptores de radio, magnetófonos y equipos musicales Números 4, 7 y 10.
CARR.– Radiorreceptores.
CUNNINGHAM.– Control remoto y automatización.
DOURIAU y JUSTER.– Transformadores en radio.
GUEULLE.– Receptores con circuitos integrados.
HETTERSCHEID.– Diseño de amplificadores de F. I. transistorizados.
HURE.– Radiorreceptores con transistores y circuitos integrados. Reparación y puesta a punto.
JUSTER.– Curso rápido de radio.
LANE.– Curso de reparación de transistores y circuitos impresos. 4ª edición.
MOOIJWEER.– Técnica de las microondas.
OTTE, SALVERDA y WILLIGEN.– Del electrón al superheterodino. 7ª edición modernizada por A. Borque.
PERALES.– Sistemas digitales en radio y TV.
ROGNON y DURU.– Servicio de receptores transistorizados. 2ª edición.
TAB BOOKS.– Manual de sustitución de válvulas. Radio y TV. 2ª edic.
TECH.– Antenas de fácil montaje.



Magallanes, 25 - 28015 Madrid

ISBN, 84-283-1333-4